



HAL
open science

Développement et automatisation d'un outil de mesure des mouvements du cheval pour l'aide à la prévention, au diagnostic et au suivi vétérinaire des affections locomotrices

Claire Macaire

► To cite this version:

Claire Macaire. Développement et automatisation d'un outil de mesure des mouvements du cheval pour l'aide à la prévention, au diagnostic et au suivi vétérinaire des affections locomotrices. Médecine vétérinaire et santé animale. École nationale vétérinaire - Alfort, 2023. Français. ⟨NNT : 2023ENVA0001⟩. ⟨tel-04361244⟩

HAL Id: tel-04361244

<https://theses.hal.science/tel-04361244v1>

Submitted on 22 Dec 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

NNT : 2023ENVA0001

DEVELOPPEMENT ET AUTOMATISATION D'UN OUTIL DE MESURE DES MOUVEMENTS DU CHEVAL POUR L'AIDE A LA PREVENTION, AU DIAGNOSTIC ET AU SUIVI VETERINAIRE DES AFFECTIONS LOCOMOTRICES

THESE DE DOCTORAT

pour obtenir le grade de

Docteur de l'École nationale vétérinaire d'Alfort

Spécialité : Sciences animales

École doctorale n°581

Agriculture, alimentation, biologie, environnement et santé (ABIES)

par

Claire MACAIRE

Directeur de thèse : Henry CHATEAU
Co-directeur de thèse : Frédéric MARIN
Co-encadrante de thèse : Pauline MARTIN

Thèse présentée et soutenue à Maisons-Alfort, le 30/10/2023

Préparée dans l'Unité « Biomécanique et Pathologie Locomotrice du Cheval »

Composition du jury avec voix délibérative :

Présidente	Laurence CHEZE, Professeur, Université Lyon 1
Rapporteur & Examinatrice	Caroline NICOL, Professeur, Aix-Marseille Université
Rapporteur & Examineur	Maarten OOSTERLINCK, Docteur (équiv. HDR), Ghent University (Belgique)
Examineur	Fabrice AUDIGIE, Professeur, Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort

Invité	Khalil BEN MANSOUR, Ingénieur de recherche, Université de Technologie de Compiègne, Alliance Sorbonne Université
--------	--

Remerciements

A l'entreprise LIM France, et son dirigeant Laurent Duray,
De m'avoir offert l'opportunité de réaliser cette thèse dans des conditions optimales.

A l'Association Nationale Recherche Technologie, à la Région Nouvelle Aquitaine, et aux
Fonds européen de développement régional de la région Normandie,
Pour le soutien financier apporté à ce projet.

Au Docteur Pauline MARTIN,
Merci pour ta confiance, ton écoute, tes conseils et pour m'avoir offert de nombreuses
opportunités autour du projet.

A mon co-directeur de thèse Professeur Henry CHATEAU,
Merci pour ton encadrement à chaque étape et ton engagement dans le projet, tes
nombreuses réflexions et tes retours minutieux qui m'ont énormément appris.

A mon co-directeur de thèse Professeur Frédéric MARIN,
Merci pour tes retours toujours positifs et pertinents, pour ton apport de connaissances
dans la recherche et la biomécanique, et pour ton implication constante au cours de cette
thèse.

Au Professeur Nathalie CREVIER-DENOIX directrice du BPLC,
D'avoir accepté d'accueillir ces travaux au sein de son unité.

A l'école doctorale ABIES,
D'avoir été réactifs et compréhensifs au cours de cette thèse. Merci pour les formations
particulièrement intéressantes.

Au Professeur Caroline NICOL et au Docteur Maarten Oosterlinck,
D'avoir expertisé ce manuscrit et pour vos retours très intéressants.

Au Professeur Fabrice AUDIGIE,
Pour l'accueil au CIRALE et pour m'avoir offert une qualité de cadre de travail
exceptionnelle. Merci d'avoir suivi le déroulement de cette thèse et d'avoir apporté un
regard de spécialiste dans ce domaine.

A la Team R&D de LIM France, et particulièrement à Marie Sapone,
Merci pour votre accueil dans l'équipe et pour tous ces échanges passionnants autour de
nos projets.

A Sandrine Hanne-Poujade,
Merci pour ta pédagogie, pour tes avis de statisticienne précieux, et pour ton soutien lors
des prises de décision. Merci particulièrement pour ta touche d'humour présente en toutes
circonstances. « Pas de Sandrine, pas de thèse » devrait devenir une maxime.

A Camille Hébert, la Normande nouvellement Bordelaise,
Merci pour tes capacités à solutionner chaque problème qu'il soit matériel, psychologique, social ou de culture générale... et qui me manquent beaucoup ! Ce fut un énorme plaisir de travailler avec toi !

A Chloé Hatrisse, mon binôme de thèse,
Pour ton travail rigoureux sur l'algorithme puis pour le partage de cette aventure qu'est une thèse. Mais surtout merci pour ton rire quotidien, ton écoute, l'ambiance que tu apportes avec toi partout où on va. Cette thèse n'aurait pas été la même sans toi.

A l'équipe du CIRALE, et plus particulièrement aux cliniciens, Jean-Marie Denoix, Virgine Coudry, Sandrine Jacquet, Lélia Bertoni et Amélie Tallaj,
Pour votre accueil et votre implication dans ce projet. Merci particulièrement pour votre écoute, vos conseils, vos retours et votre patience.

A Emeline De Azevedo,
Merci pour tout le travail minutieux que tu as réalisé, mais surtout pour ta gentillesse et ta présence au quotidien.

A Antoinette, Alberto, Alexandre, et plus personnellement Anne-Claire,
Merci pour votre implication et votre apport personnel au projet.

Aux stagiaires Noa Soffer et Clara Morisseau, et aux thésards vétérinaires Raphaëlle Pichard, Iris Timmerman, Emma Poizat, Jonathan Chevant, que j'ai encadrées,
Merci pour votre participation au projet scientifique, vous encadrer m'a beaucoup enseigné.

A la Team Arioneo, et particulièrement à Athina Miliotis, Léa Jeanneau, Marie Didier et Ophélie Paolantoni,
Pour votre envie d'apprendre, et pour votre bonne humeur et votre gentillesse à chaque événement où je ai vous retrouvées.

A la Team sellerie, et particulièrement à Arnaud Sarrazin, Carole Semanour et Boris Ladoues,
Pour votre travail efficace, votre patience et vos idées.

Aux colocataires de Janville, et particulièrement à mes stagiaires d'un jour,
Pour votre soutien et pour ce cri si typiquement janvillais « Apéro ! » pour me sortir un peu du travail.

A mes amis presque Normands, qui vivent pour les chevaux mais surtout pour les moments à partager autour de bonnes bières,
Merci pour tous ces bons moments et pour m'avoir fait découvrir la complexité de ce monde équin.

A ma famille, sans qui je ne serais pas arrivée jusque-là,
Pour m'avoir conseillée à m'engager pour cette thèse et pour être toujours là pour moi.

Enfin à ma petite famille que j'ai rencontrée dans la ferme de l'amour,
Pour simplement être toujours à mes côtés.

Table des matières

Liste des figures.....	8
Liste des tableaux	14
Liste des équations.....	16
Liste des annexes	17
Liste des abréviations.....	18
Introduction	21
1.1 Contexte général.....	22
1.2 Évaluation clinique de la locomotion chez le cheval.....	24
1.2.1 Diagnostic topographique de l'affection locomotrice	24
1.2.2 Évaluation visuelle de la boiterie.....	31
1.2.3 Limites de l'évaluation visuelle.....	36
1.3 Mesure quantitative de la locomotion.....	39
1.3.1 Principes de la biomécanique équine.....	39
1.3.2 Métrologie ou validation des outils de mesure	39
1.3.3 Outils de mesure développés pour la recherche	41
1.3.4 Les outils disponibles sur le marché vétérinaire.....	46
1.3.5 Limites de l'utilisation clinique des outils d'analyse de la locomotion.....	49
1.4 Signification clinique de la quantification de l'asymétrie.....	51
1.4.1 Les indices d'asymétrie indicateurs de boiterie	51
1.4.2 L'asymétrie chez des chevaux sains.....	59
1.4.3 Seuils de détection de la boiterie	60
1.5 Conclusion et problématique générale.....	62
OBJECTIFS DE LA THESE.....	63
2.1 Objectifs de développement.....	65
2.1.1 Présentation d'EQUISYM®.....	65
2.1.2 Les acteurs du développement.....	71
2.2 Objectifs scientifiques	73
2.2.1 Objectif 1 : Répétabilité.....	73
2.2.2 Objectif 2 : Valeurs d'asymétrie chez les chevaux sains	73

2.2.3	<i>Objectif 3 : Identification des seuils d'asymétrie pour détecter une boiterie au trot en ligne droite.....</i>	<i>74</i>
2.2.4	<i>Objectif 4 : Identification des seuils d'asymétrie pour détecter une boiterie au trot sur un cercle.....</i>	<i>75</i>
2.3	Valorisations scientifiques.....	76
2.3.1	<i>Publications scientifiques.....</i>	<i>76</i>
2.3.2	<i>Participations à des congrès.....</i>	<i>76</i>
2.3.3	<i>Travaux annexes à la thèse.....</i>	<i>77</i>
	A Pilot Study on the Inter-Operator Reproducibility of a Wireless Sensors-Based System for Quantifying Gait Asymmetries in Horses	79
3.1	Introduction	80
3.2	Materials and Methods.....	82
3.2.1	<i>Horses</i>	<i>82</i>
3.2.2	<i>Instrumentation.....</i>	<i>82</i>
3.2.3	<i>Protocol</i>	<i>82</i>
3.2.4	<i>Data processing.....</i>	<i>83</i>
3.2.5	<i>Statistical analysis</i>	<i>83</i>
3.2.6	<i>Results</i>	<i>84</i>
3.3	Discussion.....	86
3.4	Points à retenir.....	88
	Movement asymmetry measured in sound horses trotting on a straight line	91
4.1	Introduction	93
4.2	Methods	93
4.2.1	<i>Horses</i>	<i>93</i>
4.2.2	<i>Data collection.....</i>	<i>93</i>
4.2.3	<i>Data processing.....</i>	<i>94</i>
4.3	Results and discussion	94
4.4	Conclusions.....	96
4.5	Points à retenir.....	96
	Investigation of Thresholds for Asymmetry Indices to Represent the Visual Assessment of Single Limb Lameness by Expert Veterinarians on Horses Trotting in a Straight Line	97

5.1	Introduction	100
5.2	Materials and Methods	101
5.2.1	Horses	101
5.2.2	Locomotor Examination	101
5.2.3	Data collection	104
5.2.4	Data processing.....	104
5.2.5	Data analysis	104
5.3	Results	105
5.3.1	Descriptive results	105
5.3.2	Forelimb lameness discrimination.....	107
5.3.3	Hindlimb lameness discrimination.....	109
5.3.4	Asymmetry thresholds of reliable indexes.....	111
5.4	Discussion	113
5.5	Conclusions	116
5.6	Points à retenir	117
Asymmetry Thresholds Representing the Visual Assessment of Forelimb Lameness by Expert Veterinarians on Horses Trotting in circles		119
6.1	Introduction	120
6.2	Materials and Methods	122
6.2.1	Horses and conditions	122
6.2.2	Data collection	124
6.2.3	Data processing.....	124
6.2.4	Data analysis	125
6.3	Results	126
6.3.1	Descriptive results	126
6.3.2	Discrimination between lame horses with the lame forelimb on the inside of the circle and sound horses.....	128
6.3.3	Discrimination between lame horses with the lame forelimb on the outside of the circle and sound horses.....	130
6.3.4	Asymmetry thresholds of reliable indices	130
6.4	Discussion	132
6.5	Conclusions	137

6.6	Points à retenir	139
6.7	Etude complémentaire	139
DISCUSSION		143
7.1	Résumé des résultats	144
7.2	Comparaison avec la littérature et explication clinique des résultats	145
7.2.1	<i>La reproductibilité des systèmes de quantification des boiteries</i>	145
7.2.2	<i>L'asymétrie physiologique impactée par une variabilité biologique</i>	146
7.2.3	<i>Le mouvement du garrot est un indicateur de boiterie</i>	146
7.2.4	<i>Les indices d'asymétrie indicateurs de boiterie</i>	147
7.3	Intérêts et limites des matériels et méthodes	149
7.3.1	<i>L'évaluation de la boiterie</i>	149
7.3.2	<i>Collecte des données</i>	150
7.3.3	<i>Traitement des données</i>	151
7.3.4	<i>Calcul des indices d'asymétrie</i>	153
7.4	Variabilité de l'asymétrie	155
7.4.1	<i>Variabilité de l'asymétrie physiologique</i>	155
7.4.2	<i>Variabilité de l'asymétrie pathologique</i>	156
7.5	Application clinique de ce travail	157
7.5.1	<i>Sélection des indices pertinents à afficher</i>	157
7.5.2	<i>Utilisation des seuils</i>	157
7.5.3	<i>Situations d'utilisation des seuils</i>	160
7.5.4	<i>Limites d'utilisation des seuils</i>	160
7.6	Synthèse	162
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES		165
8.1	Contributions du travail de thèse	166
8.2	Perspectives scientifiques	167
8.2.1	<i>Perspectives au sujet de la boiterie</i>	167
8.2.2	<i>Contribution de ce travail aux autres projets de recherche de l'entreprise</i>	168
Références bibliographiques		170
Annexes		192

Liste des figures

<i>Figure 1 Schéma des composantes verticale (F_z), longitudinale (F_x) et transversale (F_y) de la force s'exerçant sur le pied à l'intérieur du cercle au trot (Chateau et al., 2013)</i>	<i>27</i>
<i>Figure 2 Illustration d'un test de flexion du postérieur droit. ©CIRALE.....</i>	<i>28</i>
<i>Figure 3 Illustration des types d'anesthésie diagnostique. a) Anesthésie nerveuse ; b) Anesthésie articulaire ; c) anesthésie d'une gaine tendineuse. ©EQUISYM.....</i>	<i>30</i>
<i>Figure 4 Illustration d'une image réalisée par Résonance Magnétique (IRM) d'un pied antérieur droit en région supra-sésamoïdienne (Evrard et al., 2021).</i>	<i>31</i>
<i>Figure 5 Illustration du « head nod » chez un cheval présentant une boiterie antérieure droite. Les points représentent la position de la nuque du cheval au cours du temps. Le « head nod » est décrit comme un abaissement exagéré de la tête au moment du poser du membre sain, ici l'antérieur gauche (point rouge)</i>	<i>32</i>
<i>Figure 6 Illustration du « pelvis hike » chez un cheval présentant une boiterie postérieure droite. Le point rouge représente le point le plus haut atteint par le tuber sacrale au cours d'une foulée. Le point bleu représente le point le plus haut atteint par les tuber coxae au cours d'une foulée. Ils sont atteints juste avant le début d'appui du postérieur boiteux.</i>	<i>33</i>
<i>Figure 7 Illustration des notions en métrologie. La zone verte représente les vraies valeurs et les croix les valeurs mesurées.....</i>	<i>40</i>
<i>Figure 8 Illustration en trois dimensions des forces de réaction au sol produites par un antérieur sur une plateforme de force (Ishihara et al., 2005)</i>	<i>42</i>
<i>Figure 9 Photographie d'un enregistrement par un système OMC sur une ligne droite de 5 mètres de longueur sur sol souple.....</i>	<i>43</i>
<i>Figure 10 Illustration de la composition de centrales inertielles et ses axes de mesures d'accélération et de vitesse angulaire. (Blue Trident, Vicon®).....</i>	<i>45</i>
<i>Figure 11 Le système Equinosis Q® avec le logiciel Lameness Locator (McCracken et al., 2012).....</i>	<i>47</i>
<i>Figure 12 Le système Qhorse (Qualisys®).(a. Hardeman et al., 2022) ; (b. Lawin et al., 2023).</i>	<i>48</i>

<i>Figure 13 Le système EquiMoves monté (Serra Bragança et al., 2020)</i>	<i>48</i>
<i>Figure 14 Exemple d'affichage graphique des résultats par le logiciel Lameness Locator (Equinosis®), système de quantification des boiteries, pour une « boiterie antérieure droite avec une boiterie de propulsion du postérieur droit et d'impact du postérieur gauche » (Reed et al., 2020).</i>	<i>50</i>
<i>Figure 15 Graphique de la force verticale de réaction du sol en N/kg au cours de la phase d'appui. La courbe en trait plein est celle symétrique des antérieurs d'un cheval ne présentant pas de boiterie. Les courbes en pointillés sont celles des antérieurs d'un cheval avec une boiterie induite. Les gros pointillés représentent le membre induit et les fins pointillés le membre contralatéral sain (Clayton et al., 2000).</i>	<i>52</i>
<i>Figure 16 Courbe sinusoïdale du déplacement dorso-ventral du garrot en cm (courbe bleue) au cours du temps (secondes) pendant une foulée de trot, avec l'image synchronisée. Les temps où l'antérieur gauche (AG) est à l'appui (rectangle rose) et celui où l'antérieur droit (AD) est à l'appui (rectangle bleu) sont renseignés. a) lors de la mise en charge sur l'AG, le garrot atteint une altitude minimale ; b) après la propulsion par l'AG le garrot atteint une altitude maximale ; c) lors de la mise en charge sur l'AD, le garrot atteint une altitude minimale ; d) après la propulsion par l'AD le garrot atteint une altitude maximale.</i>	<i>53</i>
<i>Figure 17 Courbe sinusoïdale du déplacement dorso-ventral de la croupe en cm (courbe bleue) au cours du temps (secondes) pendant une foulée de trot, avec l'image synchronisée. Les temps où le postérieur gauche (PG) est à l'appui (rectangle rose) et celui où le postérieur droit (PD) est à l'appui (rectangle bleu) sont renseignés. a) lors de la mise en charge sur le PG, la croupe atteint une altitude minimale ; b) après la propulsion par le PG la croupe atteint une altitude maximale ; c) lors de la mise en charge sur le PD, la croupe atteint une altitude minimale ; d) après la propulsion par le PD la croupe atteint une altitude maximale.</i>	<i>54</i>
<i>Figure 18 Deux exemples théoriques (a. et b.) de foulées asymétriques avec les appuis des pieds gauche (L) et droit (R), basés sur un modèle harmonique à 2 composants. La courbe noire est le déplacement vertical modélisé ou la somme de la courbe bleue (harmonique 1 ou composante pathologique) et de la courbe rouge (harmonique 2 ou composante saine). Le déphasage temporel $\Phi = 0$ pour le modèle a. et $\Phi = -45^\circ$ pour le modèle b. (Roepstorff et al., 2022)</i>	<i>56</i>
<i>Figure 19 Représentation des variables issues de la courbe du déplacement dorso-ventral du tronc analysées dans les études sur la boiterie (Starke et al., 2012)</i>	<i>57</i>

Figure 20 Illustration des mouvements compensatoires lors d'une boiterie postérieure au trot. Le déplacement vertical de la tête et du garrot lors d'une boiterie antérieure induite et le déplacement vertical de la tête, du garrot et de la croupe lors d'une boiterie postérieure induite sont représentés au cours d'une foulée. Le membre induit est indiqué en rouge (Rhodin et al., 2018).....58

Figure 21 L'ensemble des équipements du système EQUISYM®65

Figure 22 Courbe du déplacement dorso-ventral du garrot (en cm) au cours du temps (en % du temps de foulée) et les valeurs extraites de celle-ci afin de calculer les indices d'asymétrie AI-min, AI-max et AI-up. Les indications reportées en rose sont relatives à l'Antérieur Gauche (AG) et celles en bleue à l'Antérieur Droit (AD). Le cheval présentait une boiterie AD.....67

Figure 23 Courbe du déplacement dorso-ventral du garrot (en cm) au cours du temps (en % du temps de foulée) et les valeurs extraites de celle-ci afin de calculer les indices d'asymétrie AI-down, AI-Tmax et AI-stance_duration. Les indications reportées en rose sont relatives à l'Antérieur Gauche (AG) et celles en bleues à l'Antérieur Droit (AD). Le cheval présentait une boiterie AD.68

Figure 24 Le système EQUISYM® utilisé lors d'un examen locomoteur dynamique. Le vétérinaire a lancé l'enregistrement et filme la locomotion avec la tablette70

Figure 25 Vue rapprochée des attaches pour fixer les capteurs du système EQUISYM® au postérieur gauche (a) et au garrot (b) du cheval.....70

Figure 26 Interface de l'application EQUISYM®. Sur cette visualisation, la locomotion au trot en ligne droite sur sol dur d'Arion est comparée entre sa locomotion spontanée (bleue), après anesthésie digitale moyenne (rose) et après anesthésie proximale du suspenseur (vert) de l'antérieur droit. Les indices d'asymétrie de l'amplitude dorso-ventrale sont représentés sur le cheval à droite. L'asymétrie antérieure droite présente sur la tête et le garrot en locomotion spontanée est réduite au cours des anesthésies.....71

Figure 27 Organigramme de sélection des chevaux inclus dans les études constituant les chapitres 4 (uniquement les chevaux sains) et 5 (les chevaux sains et boiteux).....92

Figure 28 Boxplots (lines are from the minimal to the maximal value and the box are from the 25th to the 75th percentiles) of the asymmetry values (%) mesured in 49 sound horses. Dots represent the means. Positive values represent a reduction of the right-side movement and negative values represents a reduction of the left movement95

Figure 29 Schéma explicatif de l'analyse des données dans les Chapitres 5 et 6 avec des courbes Receiver Operating Characteristic (ROC) et l'établissement des seuils. a : Un seuil de valeur d'asymétrie faible est testé, il correspond à 1 point sur la courbe ROC avec une faible sensibilité et une haute spécificité. b : Un seuil de valeur d'asymétrie haute est testé, il correspond à 1 point sur la courbe ROC avec une haute sensibilité et une faible spécificité. c : Le seuil optimal est la valeur seuil correspondant au point de la courbe ROC ayant une distance minimale avec le coin supérieur gauche.....99

Figure 30 Flowchart of the exclusion/inclusion criteria of the screened horses, which were visually considered lame on a straight line by an expert veterinarian during his routine practice 103

Figure 31 Boxplots of Asymmetry Index (AI) in % for sound, left forelimb (LF), right forelimb (RF), left hindlimb (LH) and right hindlimb (RH) lame horses. The black dot represents the mean, the 2 extremities of the box are 25th and 75th percentiles, and extremities of the whiskers represent extreme data points without considering outliers. Negative value represents smaller movement on the left limb 106

Figure 32 ROC curves discriminating horses with Left Forelimb (LF) lameness from sound horses; and discriminating horses with Right Forelimb (RF) lameness from sound horses, plotted for each sensor location (head, withers, pelvis); and plotted for Asymmetry Index: AI-min (blue), AI-max (red), AI-up (black) and AI-down (cyan). The best specificity and sensitivity point of each curve is represented by a circle. The dashed black line is the hypothesized ROC curve with discrimination capacity only due to perfect chance 108

Figure 33 ROC curves discriminating horses with Left Hindlimb (LH) lameness from sound horses; and discriminating horses with Right Hindlimb (RH) lameness from sound horses, plotted for each sensor location (head, withers, pelvis); and plotted for Asymmetry Index : AI-min (blue), AI-max (red), AI-up (black) and AI-down (cyan). The best specificity and sensitivity point of each curve is represented by a circle. The dashed black line is the hypothesized ROC curve with discrimination capacity only due to perfect chance. 110

Figure 34 Thresholds (red line) of Asymmetry Indexes (AI) (in % of asymmetry) for forelimb and hindlimb lameness discrimination. Only the AIs with the sum of sensitivity and specificity over 150% for both right and left lameness are plotted. Three ranges of values are represented: yellow for 95% confidence interval (95% CI) around the threshold, green for values below the 95% CI ("sound" horses) and red for values beyond the 95% CI ("lame" horses). 112

Figure 35 Flowchart of the exclusion/inclusion criteria of the screened horses, which were visually considered lame on the both reins on circle by an expert veterinarian during his routine practice 123

Figure 36 Mean vertical displacement (cm) of the withers plotted against time (expressed as percentage of stride duration) of a horse showing right forelimb (RF) lameness. Asymmetry Indices (AIs) are $AI\text{-min} = RF_{\text{min}} - LF_{\text{min}} / LF_{\text{up}}$; $AI\text{-max} = LF_{\text{max}} - RF_{\text{max}} / LF_{\text{up}}$; $AI\text{-up} = LF_{\text{up}} - RF_{\text{up}} / LF_{\text{up}}$; and $AI\text{-Tmax} = LF_{\text{diffTmax}} - RF_{\text{diffTmax}} / LF_{\text{diffTmax}}$. (LF - Left Forelimb). 125

Figure 37 Boxplots of Asymmetry Indices (AIs) in percentage for sound horses and horses with a left forelimb lameness and right forelimb lameness. The dot represents the mean, the two extremities of the box are 25th and 75th percentiles, and extremities of the whiskers represent the minimum and maximum. A negative value reflects reduced movement or duration during the left limb stance, and positive value reflects reduced movement or duration during the right limb stance 127

Figure 38 Receiver Operating Characteristic (ROC) curves discriminating horses with a constant Left Forelimb (LF) lameness from sound horses; and discriminating horses with a constant Right Forelimb (RF) lameness from sound horses, plotted for both reins on a circle. Tested Asymmetry Indices were AI-min (blue), AI-max (red), AI-up (grey) and AI-Tmax (orange). The highest specificity and sensitivity point of each curve is represented by a circle (top-left method). The black line is the hypothesized ROC curve with discriminative power only due to chance 129

Figure 39 Thresholds (black line) of Asymmetry Indices (AIs) (in percentage of asymmetry) for lameness discrimination when the lame limb was on the inside of the circle (a) and when the lame limb was on the outside of the circle (b). Only the AIs with the sum of sensitivity and specificity over 150% for both right and left reins are plotted. Three ranges of values are represented: yellow for 95% confidence interval (95% CI) around the threshold, green for values below the 95% CI ("sound" horses) and red for values beyond the 95% CI ("lame" horses). 132

Figure 40 Effectif des chevaux inclus à partir de l'évaluation visuelle de leur locomotion sur chaque main séparément en cercle sur sol dur par un clinicien spécialiste en locomotion équine au cours d'un examen locomoteur. 140

Figure 41 Seuils d'asymétrie associés aux meilleures capacités de discrimination des chevaux sains et des chevaux présentant visuellement une boiterie postérieure droite (PD) ou gauche

(PG) en cercle à main droite ou à main gauche. Les boxplots des valeurs d'asymétrie mesurées sont représentés pour le groupe de chevaux sains (vert), le groupe de chevaux boitant du PD (bleu) et le groupe de chevaux boitant du PG (rose). Les seuils associés à une sensibilité et spécificité dont la somme est supérieure à 150% sont indiqués par une étoile rouge..... 141

Figure 42 Visualisation dans l'application EQUISYM® des valeurs absolues et des valeurs relatives des indices d'asymétrie pour le déplacement dorso-ventral du garrot d'un cheval 154

Figure 43 Courbes de déplacement dorso-ventral de la tête d'un cheval trotant à main droite et présentant une boiterie antérieure gauche (AG) de grade 3/5 selon le clinicien (A.). Et courbes mesurées après anesthésie diagnostique sur l'AG (B.). On peut noter la réapparition de la double sinusoïde après l'anesthésie locale. 155

Figure 44 Exemple de résultats d'asymétrie en % de deux chevaux présentant respectivement une unique boiterie antérieure gauche (figure de gauche) et une unique boiterie postérieure gauche (figure de droite). Les moyennes et écarts-types de chaque indice sont représentés par les curseurs bleus. Les seuils de détection des boiteries sont représentés par des triangles rouges. Le triangle situé à gauche pour les boiteries des membres gauches et le triangle situé à droite pour les boiteries des membres droits. Ils sont chacun accompagnés d'une zone jaune représentant leur intervalle de confiance à 95% (IC) et d'une zone rouge représentant la plage de valeurs supérieures à la borne haute de l'IC. Une zone verte se situe entre les bornes basses des IC gauche et droit. 159

Liste des tableaux

<i>Tableau 1 Description des grades de sévérité de la boiterie selon les échelles décrites dans la littérature (Gómez Álvarez & Oosterlinck, 2022)</i>	35
<i>Tableau 2 Total variance, total standard deviation and percentage of variance due to the operators (calculated out of the total variance) for four asymmetry indexes (AI -Up, -Down, -Max and -Min) calculated on the head (H), the withers (W) and the pelvis (P) for 48</i>	84
<i>Tableau 3 Total variance, total standard deviation and percentage of variance due to the operators (calculated out of the total) for four asymmetry indexes (AI-Up, -Down, -Max and -Min) calculated on the head (H), the withers (W) and the pelvis (P) for 48 repeated</i>	85
<i>Table 4 Residual standard deviation removing the variation part due to the operators and the subjects, for four asymmetry indexes (AI-Up, -Down, -Max and -Min) calculated on the head (H), the withers (W) and the pelvis (P) for 48 repeated measurements (4 operator</i>	86
<i>Table 5 Mean, SD, median, 5th and 95th percentiles of asymmetry indexes for 49 sound horses</i>	95
<i>Tableau 6 Number of horses showing a lameness depending on the location and the grade according to the 11-grades UK lameness scale. Mean \pm SD1 of lameness grade in each lame horses group.</i>	103
<i>Tableau 7 Mean \pm standard deviation (SD) of Asymmetry Index (AI) of the head, withers and pelvis in sound, right forelimb (RF) lame, left forelimb (LF) lame, right hindlimb (RH) lame and left hindlimb (LH) lame horses trotting on a hard straight line</i>	105
<i>Tableau 8 Area Under the Curve (AUC) of the Receiver Operating Characteristic (ROC) curve discriminating sound and forelimb lame horses, for each Asymmetry Index (AI). Best sensitivity, specificity and associated threshold were calculated using top-left method of ROC analysis. [95% Confidence Interval] were calculated plotting ROC analysis on 400 population resamplings (bootstraps). Results for which the sum of sensitivity and specificity is over 150% for both sides are in bold.</i>	109
<i>Tableau 9 Area Under the Curve (AUC) of the Receiver Operating Characteristic (ROC) curve discriminating sound and hindlimb lame horses, for each Asymmetry Index (AI). Best sensitivity, specificity and associated threshold were calculated using top-left method of ROC analysis. [95% Confidence Interval] were calculated plotting ROC analysis on 400 population</i>	

resamplings (bootstraps). Results for which the sum of sensitivity and specificity is over 150% for both sides are in bold 111

Tableau 10 Number of horses showing a lameness depending on the location and the grade according to the 11-grades UK lameness scale. Mean \pm standard deviation (SD) of lameness grade in each lame horses group 123

Tableau 11 Mean \pm SD of asymmetry indices (AIs) of the head and the withers in sound, left forelimb (LF) lame, right forelimb (RF) lame horses trotting on right rein and on left rein circles. 127

Tableau 12 Area Under the Curve (AUC) of the Receiver Operating Characteristic (ROC) curve discriminating forelimb lameness when the lame limb was on the inside of the circle from sound horses on circles, for each of the Asymmetry Indices (AIs). The highest sensitivity (Se), specificity (Sp) and associated threshold (Threshold) were calculated using the top-left method of ROC analysis. The 95% confidence intervals [;] were calculated by using a Bootstrap method, plotting ROC analysis on 400 population resamplings. Results for which the sum of sensitivity and specificity is over 150% for both circles (left and right reins) are in bold 129

Tableau 13 Area Under the Curve (AUC) of the Receiver Operating Characteristic (ROC) curve discriminating forelimb lameness when the lame limb was on the outside of the circle from sound horses on circles, for each of the Asymmetry Indices (AIs). The highest sensitivity (Se), specificity (Sp) and associated threshold (Threshold) were calculated using the top-left method of ROC analysis. The 95% confidence intervals [;] were calculated by using a Bootstrap method, plotting ROC analysis on 400 population resamplings. Results for which the sum of sensitivity and specificity is over 150% for both circles (left and right reins) are in bold. 130

Liste des équations

Équation 1 Formules de calcul des indices d'asymétrie AI-min, AI-max et AI-up à partir des variables relatives au déplacement dorso-ventral de la tête ou du garrot au trot.....67

Équation 2 Formules de calcul des indices d'asymétrie AI-down, AI-Tmax et AI-stance_duration à partir des variables relatives au déplacement dorso-ventral de la tête ou du garrot au trot.....69

Liste des annexes

<i>Annexe 1 A pilot study on the inter-operator reproducibility of a wireless sensors-based system for quantifying gait asymmetries in horses.....</i>	<i>192</i>
<i>Annexe 2 Movement asymmetry measured in sound horses trotting on a straight line</i>	<i>192</i>
<i>Annexe 3 Investigation of thresholds for asymmetry indices to represent the visual assessment of single limb lameness by expert veterinarians on horses trotting in a straight line.....</i>	<i>192</i>
<i>Annexe 4 Asymmetry Thresholds Representing the Visual Assessment of Forelimb Lameness by Expert Veterinarians on Horses Trotting in circles</i>	<i>192</i>
<i>Annexe 5 Poster présenté à l'ICEEP 2022 : Exploration of asymmetry thresholds to characterise hindlimb lameness on the circle</i>	<i>193</i>

Liste des abréviations

AAEP = American Association of Equine Practitioners

AD = Antérieur Droit

AI = Asymmetry Index ou Indice d'Asymétrie

AI-down = Ratio de l'asymétrie de l'amplitude de chute et amortissement du déplacement vertical

AI-max = Ratio de l'asymétrie de l'altitude maximale du déplacement vertical

AI-min = Ratio de l'asymétrie de l'altitude minimale du déplacement vertical

AI-Tmax = Ratio de l'asymétrie de la durée entre deux maxima consécutifs du déplacement vertical

AI-up = Ratio de l'asymétrie de l'amplitude d'élévation du déplacement vertical

AG = Antérieur Gauche

CIRALE = Centre d'Imagerie et de Recherche sur les Affections Locomotrices Equines

ENVA = Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort

ERz = Ratio de l'asymétrie des deux premières harmoniques issues de l'application de la transformée de Fourier au déplacement vertical

GRF = Ground Reaction Force

IC95 = Intervalle de Confiance à 95%

ICEEP = International Conference on Equine Exercise Physiology

IMU = Inertial Measurement Unit

LF = Left Forelimb (=AG)

LH = Left Hindlimb (=PG)

MEMS = Micro-Electro-Mechanical System

MIMU = Magneto-Inertial Measurement Unit

OMC = Optical Motion Capture

PD = Postérieur Droit

PG = Postérieur Gauche

Phi = Différence de phases entre les 2 premières harmoniques issues de l'application de la transformée de Fourier au déplacement vertical

RF = Right Forelimb (=AD in english)

RH = Right Hindlimb (=PD in english)

ROC = Receiver Operating Characteristics (curve)

SD = Standard Deviation



CHAPITRE 1

Introduction

1.1 Contexte général

La performance sportive demandée au cheval exige un contrôle irréprochable de sa santé locomotrice tout en préservant son bien-être. La recherche de performance induit des facteurs de risques sur l'appareil locomoteur (Dyson, 2000). Les lésions locomotrices sont la première cause de baisse de performance et d'arrêt de carrière des chevaux athlètes (Sagot, 2013). C'est pourquoi les vétérinaires équins sont au cœur du défi d'améliorer les performances en préservant la santé physique.

Dans cet objectif, un diagnostic précoce et précis des lésions locomotrices est essentiel (Ross et al., 1999). L'examen locomoteur du cheval consiste à évaluer le cheval en mouvement afin de détecter des anomalies locomotrices. Il oriente fortement le vétérinaire dans la suspicion d'une affection et donc sur les examens complémentaires à réaliser pour établir le diagnostic.

L'objectif de l'examen locomoteur dynamique est de déterminer le ou les membre(s) provoquant l'anomalie locomotrice. De façon simple, voire simpliste, une réduction du mouvement de la tête lors de l'appui sur un antérieur est le signe principal d'une boiterie de ce pied. De même, une boiterie postérieure s'exprime par une diminution du mouvement de la croupe lors de son appui par rapport à l'autre postérieur. Cette description est cependant réductrice et de nombreuses subtilités doivent être prises en compte pour évaluer une asymétrie locomotrice. Une boiterie est donc un trouble douloureux ou mécanique se manifestant par une dissymétrie locomotrice difficile à évaluer.

De plus, les conclusions visuelles de l'examen locomoteur dynamique sont subjectives. En effet, l'appréciation de la présence d'une boiterie, l'identification du membre concerné et la sévérité de cette boiterie sont variables d'un vétérinaire à l'autre. Ce constat a révélé un besoin d'objectiver la boiterie.

La boiterie se manifestant par une asymétrie des mouvements, des outils d'analyse de la locomotion ont été développés pour quantifier avec précision cette asymétrie. Onéreux et limités à un espace restreint, la plupart sont cependant difficilement utilisables dans la pratique vétérinaire courante. Parmi les outils de quantification

d'asymétries locomotrices, les capteurs de mesure inertielle semblent les mieux adaptés pour la mesure des mouvements au cours d'un examen locomoteur vétérinaire. Non invasive, cette technologie se présente sous forme de petits boîtiers à fixer sur les points anatomiques d'intérêt du cheval. Des systèmes composés de cette technologie sont actuellement commercialisés à destination des vétérinaires.

Cependant, les vétérinaires rencontrent des difficultés dans l'interprétation des résultats fournis par ces systèmes de mesure. Les valeurs de référence établies pour interpréter les résultats ne correspondent pas toujours aux manifestations cliniques. En effet, de nombreux chevaux sains présentent une asymétrie considérée comme pathologique selon les recommandations d'utilisation des systèmes de mesure (Kallerud et al., 2021; MacKechnie-Guire & Pfau, 2021; Rhodin et al., 2017). Ce manque de correspondance soulève des interrogations sur la relation entre la boiterie et l'asymétrie mesurée (Persson-Sjodin et al., 2019; Zetterberg et al., 2023).

Le projet dans lequel s'intègre cette thèse a donc pour objectif l'intégration d'un outil de quantification de l'asymétrie dans la pratique vétérinaire équine actuelle. La thèse a pour objectif le développement et la validation scientifique de l'outil dans des conditions cliniques. Ce travail est collaboratif et s'est effectué au Centre d'Imagerie et de Recherche sur les Affections Locomotrices Equines (CIRALE), clinique vétérinaire spécialisée dans les affections locomotrices équines, rattachée à l'Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort (ENVA).

EQUISYM®, l'outil développé au cours de cette thèse, sera présenté dans ce document. Le Chapitre 0 aborde la reproductibilité des mesures. Le Chapitre 0 décrira les valeurs mesurées dans une population de référence, c'est-à-dire sans problème locomoteur. La signification clinique des valeurs d'asymétrie au trot en ligne droite sera ensuite étudiée au Chapitre 0 en identifiant les indices les plus pertinents pour la détection des boiteries. Puis, pour ces indices sélectionnés, des seuils de détection de boiterie avec la meilleure sensibilité et spécificité seront déterminés. Dans le Chapitre 0, les seuils d'asymétrie seront définis pour la détection des boiteries antérieures lors de la locomotion en cercle.

1.2 Évaluation clinique de la locomotion chez le cheval

Lors de problèmes locomoteurs, l'objectif du vétérinaire se compose en deux temps. Il doit premièrement établir un diagnostic topographique, qui concerne la localisation du ou des site(s) douloureux responsable(s) des manifestations cliniques. Dans un second temps, le diagnostic lésionnel identifie grâce à des examens complémentaires (imagerie) la nature de la lésion et la formation anatomique concernée.

1.2.1 Diagnostic topographique de l'affection locomotrice

En plus d'un examen général, un examen locomoteur spécifique est effectué par le vétérinaire afin de localiser la source du problème. Le premier objectif de cet examen est d'identifier le membre concerné par la douleur principale. Le deuxième objectif est d'analyser la potentielle présence d'autres sites douloureux. Le dernier objectif de cet examen est de recueillir des informations sur la localisation plus précise de ces lésions (Ross & Dyson, 2011). Ainsi avec des examens d'imagerie limités aux lieux de suspicion, le diagnostic lésionnel est facilité.

Anamnèse

L'anamnèse apporte des informations essentielles. En effet la locomotion est grandement influencée par l'âge, la race et la discipline exercée. La discipline étant liée à la race, les locomotions sont spécifiques aux exercices demandés. C'est pourquoi les études sur la locomotion du cheval séparent les sujets par race (Kallerud et al., 2021; Pfau et al., 2022; Rhodin et al., 2022). De même, selon l'intensité du travail actuel, la douleur causée par la lésion ne s'exprime pas avec la même sévérité.

Examen locomoteur statique

Dans un premier temps au repos et à distance, le clinicien observe la symétrie, les aplombs du cheval, son attitude et d'éventuelles déformations. Ensuite il palpe les différentes structures osseuses, tendineuses et articulaires du cheval. Il évalue alors la chaleur, un épaissement, une sensibilité, des adhérences. Les tests de mobilisation passive permettent d'apprécier l'amplitude et la sensibilité de certains

mouvements. L'ensemble de ces tests au repos oriente sur les localisations possibles des lésions.

Examen locomoteur dynamique

Lors de l'examen locomoteur dynamique, le vétérinaire évalue les manifestations cliniques des troubles locomoteurs dans des conditions standardisées et répétables. Cette étape a pour objectifs de déterminer le membre le plus douloureux, puis si d'autres membres le sont aussi, de quantifier la sévérité des signes cliniques, et enfin de détecter d'autres éléments d'information orientant le diagnostic (Ross & Dyson, 2011).

L'examen locomoteur dynamique consiste en l'évaluation de la locomotion du cheval lors de la réalisation de différents exercices. Le cheval est tenu en longe par son propriétaire ou la personne l'ayant amené. Cette personne demande au cheval d'effectuer les différents exercices sous l'œil du vétérinaire. Elle marche et court à ses côtés ou le fait tourner autour d'elle en longe lors des exercices sur le cercle. Le protocole des exercices est standardisé. Par exemple, celui effectué au CIRALE, lieu de collecte des données au cours de cette thèse, suit l'ordre suivant :

- Huit de chiffre au pas sur sol dur
- Cercle à main gauche au pas sur sol dur (tourne dans le sens antihoraire)
- Cercle à main gauche au trot sur sol dur
- Cercle à main droite au pas sur sol dur (tourne dans le sens horaire)
- Cercle à main droite au trot sur sol dur
- Ligne droite au pas sur sol dur
- Ligne droite au trot sur sol dur
- Tests de flexion en ligne droite au trot sur sol dur
- Cercle à main gauche au pas sur sol souple
- Cercle à main gauche au trot sur sol souple
- Cercle à main gauche au galop sur sol souple
- Cercle à main droite au pas sur sol souple
- Cercle à main droite au trot sur sol souple
- Cercle à main droite au galop sur sol souple
- Tests de locomotion complémentaires

Ce protocole est cité à titre d'exemple, car dans d'autres pratiques des exercices différents peuvent être demandés et l'ordre peut être modifié. Par exemple le trot en ligne droite peut être réalisé sur un sol souple.

La locomotion est donc évaluée aux 3 allures. Le pas, allure lente, permet de voir des mouvements plus subtils et de juger la coordination. Le trot est une allure symétrique et avec des chocs importants. Les boiteries sont donc essentiellement détectées au trot et le membre concerné est identifié à cette allure. Enfin le galop est l'allure où l'amplitude des mouvements du dos et la propulsion des postérieurs sont principalement évaluées.

Les cercles induisent des contraintes particulières. Le dos se courbe latéralement pour s'inscrire dans le cercle. Le cheval se penche vers l'intérieur du cercle de façon à compenser les forces centrifuges. Les membres sont donc plus inclinés par rapport au sol. Les articulations de l'extrémité distale du membre subissent donc des mouvements de collatémotion et de rotation axiale (Denoix, 2021), induisant des contraintes asymétriques sur les surfaces articulaires et les tissus mous. Le membre externe est soumis à une force de mise en charge plus forte et plus prononcée sur le côté médial du membre. Le membre interne est soumis quant à lui à une force de mise en charge plus longue et plus prononcée sur le côté latéral du membre (Chateau et al., 2013). La Figure 1 illustre la position du corps sur le cercle. L'exacerbation ou la diminution des signes cliniques à chaque main orientent sur la localisation des lésions (Ross & Dyson, 2011). De même, ces contraintes révèlent des boiteries non visibles en ligne droite (Dyson & Greve, 2016).

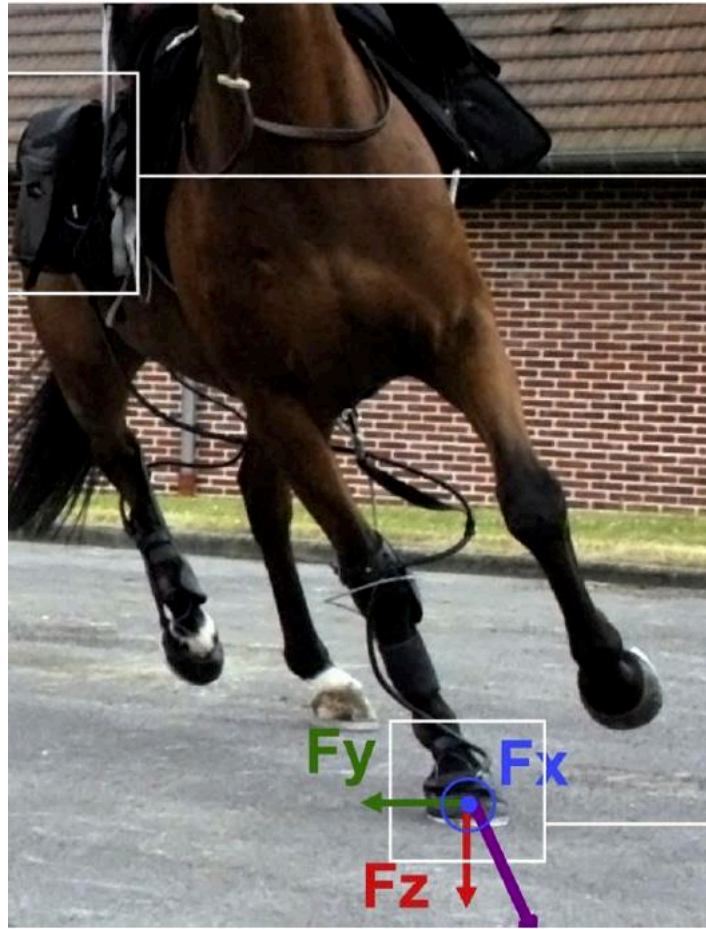


Figure 1 Schéma des composantes verticale (F_z), longitudinale (F_x) et transversale (F_y) de la force s'exerçant sur le pied à l'intérieur du cercle au trot (Chateau et al., 2013)

Les contraintes appliquées sur les membres dépendent aussi de la nature du sol. Un sol dur, tel que l'asphalte, implique des chocs importants avec un pic de force verticale et une vitesse de mise en charge sur le pied plus élevés (Crevier-Denoix et al., 2010). Les douleurs articulaires de l'extrémité distale du membre y sont exacerbées. À l'inverse, le sol souple, tel que du sable, diminue ces pics de force verticale, tout en augmentant les efforts de propulsion. En cercle, le sol souple offre plus de liberté au pied pour s'orienter par rapport à l'axe du sol qu'en cercle sur sol dur. Les contraintes en collatémotion et rotation axiale des articulations digitales y sont donc diminuées (Chateau et al., 2013; Denoix, 2021). À l'inverse, les sollicitations tendineuses peuvent y être exacerbées. Ainsi, la comparaison de la locomotion en cercle sur des sols différents donne à nouveau des indications sur la localisation des lésions en fonction de la symptomatologie dans les différentes conditions.

Des tests de flexion sont effectués pour chaque membre. Un test de flexion se réalise à l'arrêt en maintenant manuellement le membre plié de telle sorte que les articulations soient en compression et que les tendons et ligaments soient relâchés ou en tension, tel qu'illustré à la Figure 2. À la fin de cette mise en contrainte d'une minute, le membre est relâché et le cheval trotte en ligne droite. Sa locomotion après contrainte est comparée au précédent trot en ligne droite afin de juger de la douleur provoquée par ces contraintes. Cependant un test de flexion peut également induire une boiterie alors qu'aucune lésion n'est diagnostiquée sur le membre fléchi (Dyson & Greve, 2016; Starke et al., 2012).



Figure 2 Illustration d'un test de flexion du postérieur droit. ©CIRALE

Enfin d'autres tests peuvent compléter cet examen locomoteur de base. Par exemple, des tests consistent à serrer un surfaix autour du thorax du cheval ou à mettre une selle. En appuyant sur des zones douloureuses, un inconfort locomoteur peut se révéler. Enfin le cheval peut être monté et travaillé dans les circonstances d'apparition de la difficulté (Dyson & Greve, 2016). Le cavalier peut par exemple demander au cheval de réaliser une figure de dressage ou de sauter (Ross & Dyson, 2011).

Les exercices composant l'examen locomoteur dynamique sont adaptés à chaque cas. Un cheval nerveux le réalisera dans un lieu fermé et sans distraction. Un cheval avec une boiterie sévère ne trottera pas longtemps. Un cheval qui n'a pas l'habitude d'être

longé ne tournera pas en cercle. Un cheval dangereux pour le meneur pourra être lâché dans un lieu clos pour évaluer sa locomotion sans prendre de risques.

L'examen décrit ici est celui effectué au CIRALE, un centre de référence disposant d'infrastructures spécifiques. Les vétérinaires itinérants se déplacent au centre équestre et examinent le cheval dans des conditions de terrain variables. Les exercices sont adaptés en fonction des espaces disponibles, avec des natures de sol variables. Un sol dur peut être composé de terre sèche, de macadam, de graviers, de pavés, ou d'un recouvrement caoutchouc. Le sol souple utilisé est souvent le sol en sable de la carrière ou du manège. Les propriétés mécaniques d'un sol sablonneux sont dépendantes de la quantité d'eau contenue et engendrent des forces différentes sur le membre (Crevier-Denoix et al., 2010). Les conditions peuvent donc varier pour les examens locomoteurs réalisés sur le terrain.

Au bilan, un examen complet de la locomotion permet au clinicien d'orienter son diagnostic topographique en ce qui concerne :

- le membre où la lésion principale se situe
- l'atteinte potentielle d'autres membres qui participent au tableau clinique global (boiterie multiple)
- les premiers éléments d'un diagnostic différentiel sur la localisation de la lésion.

Les anesthésies diagnostiques

Une anesthésie diagnostique est un examen complémentaire permettant de localiser la douleur plus précisément dans le membre. Elle consiste en l'administration locale d'un produit anesthésiant. Ce produit s'injecte à proximité de nerfs, dans une articulation, une bourse ou une gaine, comme illustré à la Figure 3. Lors d'anesthésie nerveuse, les influx de douleur et de sensibilité provenant de la partie en aval ne sont plus transmis. Après le temps d'action du produit anesthésique, la locomotion est comparée de mémoire à celle vue avant l'anesthésie dans les mêmes circonstances. Si une amélioration est remarquée, cela signifie que la partie anesthésiée était source de douleur. Cet examen complémentaire permet aussi d'identifier plusieurs sites douloureux en cas de boiterie multiple en segmentant les manifestations cliniques de chaque lésion.

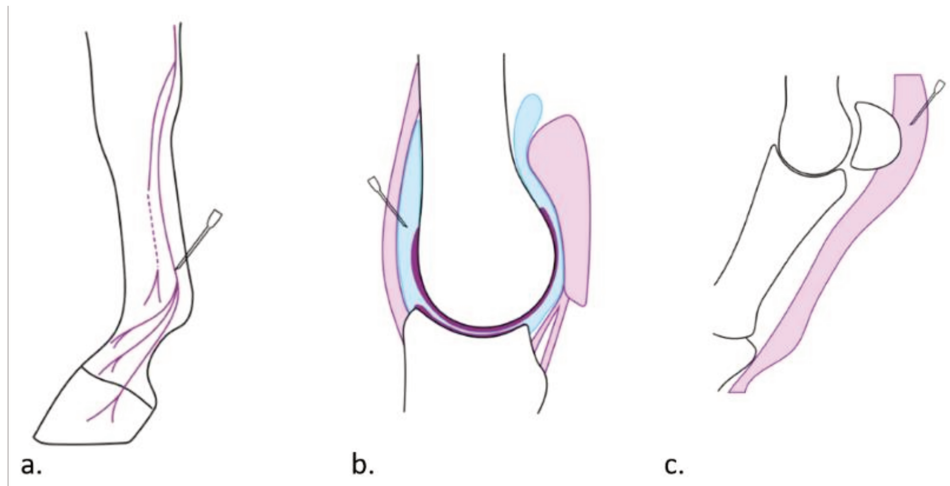


Figure 3 Illustration des types d'anesthésie diagnostique. a) Anesthésie nerveuse ; b) Anesthésie articulaire ; c) anesthésie d'une gaine tendineuse. ©EQUISYM

Les examens d'imagerie

Une fois le diagnostic différentiel établi, l'imagerie des régions suspectes a pour objectif de préciser la nature et la sévérité de la lésion responsable des symptômes. Les techniques d'imagerie varient selon la nature des formations anatomiques et leur localisation. La radiographie est adaptée pour l'examen des structures osseuses et des articulations. L'échographie permet d'explorer les tissus mous ou les structures liquidiennes comme les tendons, les ligaments, les bourses, le cartilage et la synovie.

Une imagerie plus poussée telle que l'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM), illustrée à la Figure 4, et le scanner permettent d'analyser plus finement les lésions ou d'explorer des régions non accessibles par la radiographie et l'échographie. La scintigraphie quant à elle améliore le diagnostic topographique en mettant en évidence des zones de remaniement osseux.



Figure 4 Illustration d'une image réalisée par Résonance Magnétique (IRM) d'un pied antérieur droit en région supra-sésamoïdienne (Evrard et al., 2021).

Le pronostic et le traitement

Une fois le diagnostic lésionnel établi, un pronostic lésionnel, sportif et vital est estimé. Des recommandations sur le mode de vie et d'entraînement de l'animal sont transmises, et parfois un traitement est administré. L'amélioration est vérifiée principalement avec l'évolution de la locomotion par rapport à celle observée au début du traitement.

La description simplifiée des étapes du diagnostic vétérinaire des lésions locomotrices a permis de définir le rôle de l'examen locomoteur dynamique :

→ L'examen locomoteur dynamique dans des conditions standardisées a pour but d'établir la symptomatologie des troubles locomoteurs. Cet examen est donc essentiel dans le diagnostic topographique de lésions locomotrices et dans l'évaluation de l'intensité des symptômes.

1.2.2 Évaluation visuelle de la boiterie

La précision du diagnostic topographique est un gain précieux de temps et de coûts médicaux pour le vétérinaire comme pour le propriétaire. C'est pourquoi l'évaluation de l'examen locomoteur dynamique est un point stratégique d'amélioration de la pratique vétérinaire.

Définition de la boiterie

La boiterie (lameness en anglais) est : "an indication of a structural or functional disorder in one or more limbs or the back that is evident when the horse is standing or

in movement” ; ou “simply a clinical sign – a manifestation of the signs of inflammation, including pain, or a mechanical defect – that results in a gait abnormality characterized by limping” ; ou “an alteration of the normal gait due to a functional or structural disorder in the locomotor system” (Weeren et al., 2017).

Ces définitions mettent en avant 2 conditions à l'appellation boiterie : il existe une anomalie dans la locomotion, et cette anomalie est provoquée par un trouble fonctionnel ou structurel (lésion de l'appareil locomoteur). L'objectif du changement de locomotion est de limiter les contraintes sur la structure douloureuse. Par exemple lors de mise en charge douloureuse sur un membre, l'objectif de la boiterie est de reporter la charge sur les autres membres. Les mouvements décrits ci-après sont des stratégies adoptées par le cheval dans ce but.

Les mouvements du tronc

La reconnaissance d'une boiterie antérieure au trot est principalement décrite par un mouvement de tête spécifique, qualifié par les anglo-saxons de « head nod ». La tête descend lors de l'appui du membre sain et/ou remonte lors du poser du membre boiteux (Figure 5). L'observation du garrot et des membres antérieurs est également importante dans l'identification d'une boiterie antérieure. Lors de l'observation de profil, une chute plus franche du garrot lors de la mise en charge sur un antérieur est le signe de la présence d'une boiterie de l'autre antérieur. La descente du garrot traduit en effet une plus forte mise en charge du membre sain.



Figure 5 Illustration du « head nod » chez un cheval présentant une boiterie antérieure droite. Les points représentent la position de la nuque du cheval au cours du temps. Le « head nod » est décrit comme un abaissement exagéré de la tête au moment du poser du membre sain, ici l'antérieur gauche (point rouge)

La boiterie postérieure s'observe sur le pelvis (bassin) d'un cheval s'éloignant puis revenant vers l'observateur. Ross et Dyson (2011) décrivent un pelvis qui monterait

plus haut lors du début d'appui du postérieur atteint, et qui descendrait plus bas lors de la mise en charge sur le postérieur sain. La montée décrite est appelée « pelvis hike » (Figure 6). Ce mouvement de pelvis peut aussi s'accompagner de mouvements de tête plus prononcés. Contrairement aux boiteries antérieures, la descente exacerbée de la tête a lieu lors de l'appui du membre postérieur atteint afin de réorienter le poids vers les antérieurs (Weishaupt, 2004). D'autres signes dans les mouvements des membres peuvent être les témoins d'une boiterie.



Figure 6 Illustration du « pelvis hike » chez un cheval présentant une boiterie postérieure droite. Le point rouge représente le point le plus haut atteint par le tuber sacrale au cours d'une foulée. Le point bleu représente le point le plus haut atteint par les tuber coxae au cours d'une foulée. Ils sont atteints juste avant le début d'appui du postérieur boiteux.

Les mouvements des membres

Les mouvements des membres peuvent être révélateurs d'anomalies. Lors de la mise en charge du membre, l'articulation métacarpo-phalangienne (boulet) s'étend. Cette extension s'accompagne d'une horizontalisation du paturon (partie anatomique sous le boulet) et donc d'une descente du boulet. Une descente moins marquée est donc le signe d'une réduction de la charge appliquée sur le membre. Cette réduction de mouvement est donc un signe remarquable d'une boiterie d'appui (Back & Clayton, 2013).

L'amplitude cranio-caudale (avant-arrière) du mouvement des membres est également évaluée. La réduction de l'avancement du membre en direction crâniale lors du début d'appui est appelée défaut de protraction. La réduction de l'amplitude vers l'arrière du membre lors de la propulsion, avec un pied qui quitte plus tôt le sol, est noté comme un défaut de rétraction (Kramer et al., 2000). Une boiterie peut être accompagnée d'un défaut de protraction ou de rétraction du membre concerné (Ross & Dyson, 2011). L'amplitude totale des foulées est alors raccourcie (Deuel et al., 1995). Ce signe est particulièrement recherché lors de boiterie antérieure bilatérale (Ross & Dyson, 2011).

Enfin la trajectoire du sabot lors de la phase de soutien (swing phase) peut être révélatrice d'anomalies. La rotation, la hauteur et la déviation par rapport à l'axe du tronc sont ainsi analysées (Kramer et al., 2000; Ross & Dyson, 2011).

L'intensité

Les signes d'une boiterie décrits ci-dessus sont plus ou moins marqués. Dans l'analyse de la locomotion, un grade est utilisé pour décrire l'intensité de ces signes (et donc de la sévérité de l'anomalie locomotrice). Différentes échelles existent (Dyson, 2011; Gómez Álvarez & Oosterlinck, 2022). Le Tableau 1 reprend les échelles les plus utilisées dans la littérature. Au CIRALE, un grade par membre et par condition est attribué. Il est noté de 0 (pas de soulagement de ce membre visible) à 5 (le cheval ne pose pas ce membre à terre), par incréments de 0,5. Cette échelle n'est pas décrite dans la littérature, mais peut être transposée en une échelle allant de 0 à 10 par incréments de 1. Cette transposition permet de se rapprocher d'une échelle utilisée au Royaume-Uni et décrite par May et Wyn-Jones (1987), Arkell et al. (2006) et Dyson (2011).

Tableau 1 Description des grades de sévérité de la boiterie selon les échelles décrites dans la littérature (Gómez Álvarez & Oosterlinck, 2022)

Score	The lameness grading system of the AAEP	The lameness grading system described by WynJones	The lameness grading system described by Ross (2011)	The lameness grading system described by Stashak (2020)
0	Lameness not perceptible under any circumstances	Sound	Sound	Sound
1	Lameness is difficult to observe and is not consistently apparent, regardless of circumstances (e.g., under saddle, circling, inclines, hard surface, etc.)	The minimal degree of lameness is detectable, which may be inconsistent	Mild lameness is observed while the horse is trotted in a straight line. When the lame forelimb (FL) strikes, a subtle head nod is observed; when the lame hindlimb (HL) strikes, a subtle pelvic hike occurs. The head nod and pelvic hike may be inconsistent at times	Lameness is not observed at a walk but is recognisable at a trot. For forelimbs (FL), the horse drops his head down on the sound limb and raises it up to a more normal height on the affected side. For the hindlimb (HL), a mild asymmetry in gluteal rise is noted. No changes in head and neck movement are evident. There is increased hoof sound from the sound limb
2	Lameness is difficult to observe at a walk or when trotting in a straight line but consistently apparent under certain circumstances (e.g., weight-carrying, circling, inclines, hard surface, etc.)	A consistent, but mild, degree of lameness—detectable and consistent subtle head nod	Obvious lameness is observed. The head nod and pelvic hike are seen consistently, and excursion is several centimetres	An alteration in gait is noted at a walk, but no overt head movements are associated with it. At a trot the lameness becomes obvious and some head and neck lifting occurs when the affected FL hits the ground. For the HL, a greater degree of asymmetry of gluteal rise and shortened duration is noted. A slight dropping of the head will be noted when the opposite FL hits the ground
3	Lameness is consistently observable at a trot under all circumstances	Consistent and obvious head nod/pelvic asymmetry	Pronounced head nod and pelvic hike of several centimetres are noted. If the horse has unilateral singular HL lameness, a head and neck nod is seen when the diagonal FL strikes the ground	Lameness is obvious at both walk and trot. Head and neck lifting during weight-bearing is a prominent feature for the FL; for the HL, head nodding when the opposite FL hits the ground is obvious
4	Lameness is obvious at a walk	Pronounced head nod/pelvic asymmetry	Severe lameness with extreme head nod and pelvic hike is present. The horse can still be trotted	Non-weight-bearing lameness
5	Lameness produces minimal weight-bearing in motion and/or at rest or a complete inability to move	Marked head nod/pelvic asymmetry	The horse does not bear weight on the limb. If trotted, he carries the limb. Horses that are non-weight-bearing at the walk or while standing should not be trotted	
6		Very marked head nod/pelvic asymmetry		
7		Difficulty trotting; only just able to place heels to the ground		
8		Minimal weight-bearing, heels not placed on the ground		
9		Only able to touch the limb to the ground		
10		Unable to put limb to the ground		

1.2.3 Limites de l'évaluation visuelle

Des méthodes d'évaluation différentes

La difficulté rencontrée pour définir une échelle avec des critères précis a pour origine la diversité des techniques d'évaluation de la boiterie.

Au minimum 5 méthodes d'évaluation des boiteries postérieures ont été décrites, prenant en compte le tuber sacrale (partie la plus haute du pelvis) ou les tuber coxae (parties latérales du pelvis), et leur mouvement vers le haut et/ou le bas ou leur rotation (May & Wyn-Jones, 1987; Starke & May, 2022b, 2022a).

Le suivi de regards de vétérinaires pendant une évaluation de la boiterie sur vidéo révèle une diversité de points regardés (Starke & May, 2022a). La tête, le haut du pelvis, l'épaule et le grasset sont les régions les plus évaluées.

Par ailleurs, à ce jour aucun consensus n'a été obtenu pour établir une échelle officielle de sévérité. Dyson (2011), Gomez Alvarez et Oosterlinck (2022) questionnent la précision des différentes échelles utilisées en pratique. Particulièrement, Ross et Dyson (2011) sont critiques sur le système AAEP (Tableau 1) qui mélange la locomotion au pas et au trot, qui ne distingue pas les conditions et qui classerait la grande majorité des boiteries en grades 3 et 4. La définition d'une échelle de grade avec des critères précis permettrait d'améliorer la reproductibilité de la méthode (Hewetson et al., 2006). La limite de cette méthode reste cependant la diversité des formes de boiterie.

Les conditions d'évaluation

L'angle de vue varie en fonction des pratiques. L'évaluation des asymétries locomotrices sur un cheval vu de face s'éloignant puis revenant vers l'évaluateur semble être un point de vue très reporté dans la littérature (Bragança et al., 2020; Lawin et al., 2023; Starke et al., 2021; Starke & May, 2022a; Starke & Oosterlinck, 2019). Avec cette perspective, les mouvements du pelvis et de la tête sont principalement évalués, mais aussi les mouvements médio-latéraux des membres. Utilisée au CIRALE, la vision de côté d'un cheval traversant une ligne droite distante

de l'évaluateur ajoute l'évaluation du garrot, de la protraction, de la rétraction, de la descente des boulets et de l'atterrissage du pied au sol (pince ou talon).

Le manque de discipline, le manque d'entrain ou l'énervement chez certains chevaux rendent difficile l'évaluation de la boiterie, car les mouvements ne se répètent pas. Dans ces circonstances, l'utilisation de tranquillisants peut être recommandée pour révéler des boiteries chez les chevaux nerveux (Baxter, 2020), mais cette pratique reste controversée (Ross & Dyson, 2011).

Les limites de la perception de l'œil humain

L'œil humain aurait une limite de fréquence d'échantillonnage de 24Hz (Holcombe, 2009), ce chiffre reste controversé (Kuroki et al., 2006). Plusieurs études ont par ailleurs montré que l'œil a une perception des mouvements asymétriques à partir de 25% d'asymétrie (Parkes et al., 2009; Starke et al., 2021; Starke & Oosterlinck, 2019). Elles concluent en effet que la majorité (>50%) des observateurs jugeaient le mouvement symétrique lors de la modélisation d'une asymétrie inférieure à 25%.

La subjectivité de l'évaluation visuelle

L'ensemble de ces limites conduisent à s'interroger sur la répétabilité de l'évaluation visuelle des boiteries. Certaines études relatent une bonne concordance entre les évaluateurs (Pleasant, 1997; Schumacher et al., 2001). Keegan et al. (2010) décrivent quant à eux une mauvaise concordance de 76.6%. Cette étude compare l'évaluation de la présence/absence pour chaque membre de 131 chevaux trotant en ligne droite par 3 à 5 vétérinaires en direct (pas sur vidéo). Pfau et al. (2020) décrivent eux aussi une faible concordance entre 6 observateurs pour l'évaluation du membre et du grade de boiterie sur 25 chevaux. La répétabilité intra-individuelle est elle aussi questionnable. Ainsi, la concordance des grades de sévérité entre 2 visionnages à un temps d'écart par une même personne est considérée comme modérée (Bragança et al., 2020), bonne (Fuller et al., 2006), ou très bonne (Greve & Dyson, 2014), soulignant les controverses à ce sujet.

Plusieurs facteurs de subjectivité ont été identifiés.

L'expérience augmenterait la concordance (Arkell et al., 2006; Hammarberg et al., 2016; Starke & May, 2017) et abaisserait le grade moyen attribué (Arkell et al., 2006), ou n'aurait pas d'effet (Jung, 2021). L'entraînement récent à l'identification de la boiterie améliore particulièrement cette capacité de détection visuelle (Starke et al., 2021; Starke & May, 2017; Starke & Oosterlinck, 2019). Une méthode d'apprentissage à l'évaluation de la boiterie similaire diminuerait la variation inter-observateur (Starke et al., 2021; Starke & May, 2017).

La concordance serait équivalente, voire meilleure, avec une vision du cheval de côté que de derrière (Bragança et al., 2020). L'évaluation de la boiterie à partir d'une vidéo diminuerait la concordance entre évaluateurs (Bragança et al., 2020; Donnell et al., 2015).

L'évaluation sur le cercle semble être plus variable que sur la ligne droite (Hammarberg et al., 2016; Keegan et al., 2010). En ligne droite, plus de chevaux sont considérés sains avec l'augmentation de la vitesse du trot (Starke et al., 2013). La concordance entre évaluateurs baisse fortement pour les boiteries postérieures par rapport aux boiteries antérieures (Hammarberg et al., 2016; Keegan et al., 2010; Peham et al., 2001; Starke et al., 2021; Starke & May, 2017). De plus, les faibles grades de boiterie sont plus difficiles à repérer, avec une concordance plus faible (Hammarberg et al., 2016; Keegan et al., 2010; Starke et al., 2021; Starke & Oosterlinck, 2019). Lors de doute, l'observateur a tendance à classer le cheval comme boiteux (Starke et al., 2021; Starke & Oosterlinck, 2019). Enfin, l'évaluation après anesthésie diagnostique semble biaisée car les évaluations en aveugle résultent en des changements de locomotion inférieurs à ceux issus des évaluateurs informés de l'anesthésie (Arkell et al., 2006).

La description des méthodes d'évaluation de la boiterie par les vétérinaires et leurs limites mènent à la conclusion suivante :

→ Les troubles locomoteurs chez le cheval se manifestent par un ensemble de signes qui peuvent être discrets. La définition, la reconnaissance et l'évaluation de l'intensité d'une boiterie dépendent de l'observateur. Toute aide pour rendre ce processus plus objectif représente donc une avancée décisive dans l'amélioration de la démarche diagnostique du clinicien.

1.3 Mesure quantitative de la locomotion

1.3.1 Principes de la biomécanique équine

La biomécanique consiste en l'application des outils de la mécanique, ses méthodes et principes, aux systèmes vivants. Appliquée à la locomotion du cheval, la biomécanique permet d'étudier les phénomènes physiques du système locomoteur du cheval.

L'histoire de la biomécanique équine est retracée en détail par Back et Clayton (2013). L'étude de la biomécanique équine s'est développée avec la technologie permettant de mesurer la locomotion. En effet la biomécanique implique la mesure au cours du temps des paramètres physiques tels que les forces, les déplacements et les orientations du corps entier et des segments anatomiques. Des outils cinétiques et cinématiques se sont développés au cours du temps permettant des mesures de plus en plus précises.

Le prérequis à toute étude scientifique dans ce domaine est d'avoir un outil fiable fournissant des données quantitatives décrivant le mouvement et/ou les forces associées.

1.3.2 Métrologie ou validation des outils de mesure

La métrologie est la science de la mesure. Elle inclut tous les aspects théoriques et pratiques de la mesure, l'incertitude de la mesure et le champ d'application. La validation de tout outil de mesure inclut la détermination de l'incertitude de la mesure. En effet, il est attendu des valeurs mesurées qu'elles soient proches de la vraie mesure et qu'elles soient répétables. L'exactitude, ou en anglais « accuracy », est la proximité entre les valeurs mesurées par l'outil à tester et la valeur de référence. Elle se compose de 2 notions à valider : la justesse et la fidélité (ISO 5725-1:1994, 1994). La Figure 7 illustre ces notions.

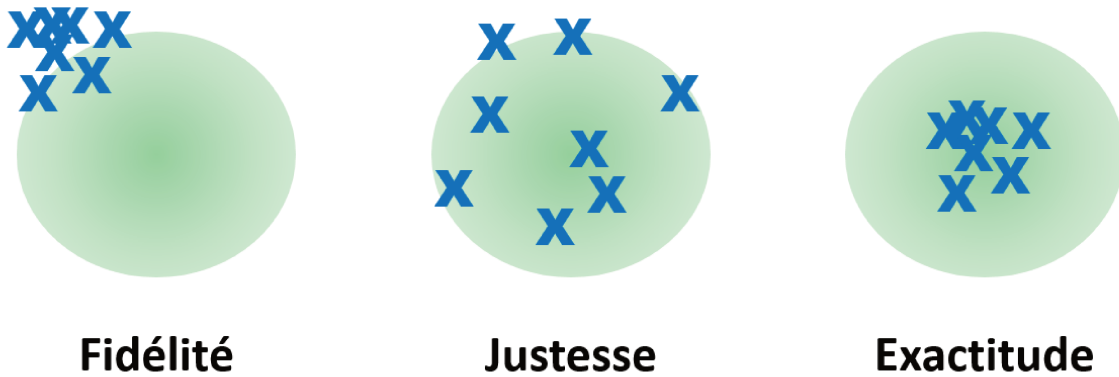


Figure 7 Illustration des notions en métrologie. La zone verte représente les vraies valeurs et les croix les valeurs mesurées.

La justesse de la mesure

La justesse, ou en anglais « trueness », est la concordance entre la moyenne d'une série de valeurs mesurées par l'outil à tester et la valeur de référence (ISO 5725-1:1994, 1994). Ainsi après avoir défini une référence, les valeurs obtenues avec l'outil testé sont comparées avec celles obtenues avec le système de référence.

La fidélité de la mesure

La fidélité, ou en anglais « precision », est la concordance entre les valeurs obtenues au cours de mesures du même élément sous certaines conditions précises. La fidélité se décline en fonction des conditions. La répétabilité est la fidélité lorsque les valeurs ont été mesurées indépendamment avec la même méthode, dans le même laboratoire, par le même opérateur, utilisant le même équipement et dans un intervalle de temps court. La reproductibilité est la fidélité lorsque les valeurs ont été mesurées indépendamment avec la même méthode, dans des laboratoires différents, par des opérateurs différents ou utilisant des équipements différents (ISO 5725-1:1994, 1994).

Ce paragraphe permet de conclure que :

→ La justesse et la fidélité sont des caractéristiques essentielles à déterminer pour connaître les incertitudes liées à un outil de mesure.

1.3.3 Outils de mesure développés pour la recherche

Les outils cinétiques

La cinétique étudie les mouvements sous l'influence de forces. Elle comprend la mesure des forces dans l'espace et le temps (Barrey, 1999; Clayton, 1996). Pour l'étude des boiteries, les forces internes et externes au membre sont mesurées (Biewener, 1998; Van Den Bogert et al., 1989). Ainsi, des capteurs de force piézoélectriques et de pression piézorésistifs intégrés dans des plateformes mesurent les forces externes sous le pied, appelées forces de réaction du sol ou en anglais « ground reaction force » (GRF). Des capteurs à jauges de contrainte insérés dans les tendons mesurent les forces internes (Ravary et al., 2004). De manière générale, une force diminuée refléterait la diminution des contraintes sur les structures douloureuses. Cela correspond au mécanisme mis en jeu par l'animal lors d'une boiterie pour atténuer le phénomène douloureux.

La justesse de la force mesurée par l'une des plateformes de force les plus connues (Kistler®) a été évaluée à des erreurs inférieures à 2%, et la justesse de la localisation du point d'application de la force a été évaluée à +/- 10 mm (Bobbert & Schamhardt, 1990). Après calibration, les plateformes de pression ont montré une justesse inférieure à 1.5% en comparaison à une plateforme de force (Faber et al., 2012; Oosterlinck et al., 2010; 2012).

La répétabilité des mesures issues de plateformes de force a été mesurée avec une variabilité inférieure à 10% chez des chevaux sains (Lynch et al., 2005) et un coefficient de variation inférieur à 6% chez des chevaux boiteux (Dow et al., 1991; Kaido et al., 2016).

La mesure de la force sous le pied apporte une information non visible à l'œil et est considérée comme la référence de mesure de la boiterie d'appui. Donnel et al. (2015) quant à eux ont rapporté que cet outil identifiait le membre où la boiterie était induite moins souvent que l'évaluation subjective. La mesure avec une plateforme de force comporte cependant des désavantages dans son utilisation. D'abord, l'ajout d'un élément de mesure sous le pied modifie la locomotion. De plus, la vitesse lors de l'acquisition doit être standardisée, car elle a un effet sur la mesure de la force (Dutto et al., 2004). Elle est aussi limitée dans l'espace et ne permet la mesure que d'un pied

pour chaque passage de l'animal, comme illustré dans la Figure 8. Cette acquisition laborieuse peut être évitée en intégrant la technologie dans un fer (Chateau et al., 2009) ou dans un tapis roulant (Weishaupt et al., 2001). Enfin cette technologie est très onéreuse.

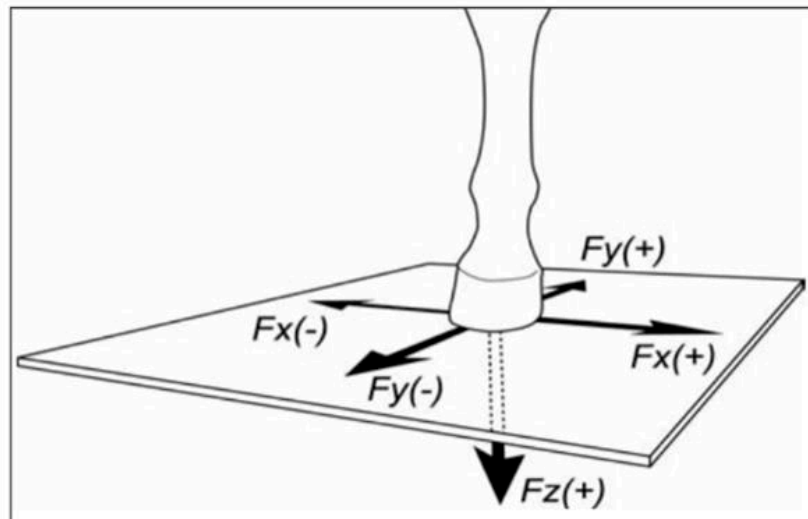


Figure 8 Illustration en trois dimensions des forces de réaction au sol produites par un antérieur sur une plateforme de force (Ishihara et al., 2005)

Pour réduire certaines contraintes d'utilisation, une plateforme de pression composée de capteurs piézorésistifs, moins onéreuse et moins volumineuse, a été développée (Oosterlinck et al., 2010). Cependant elle se révèle moins précise que les plateformes de forces particulièrement lors des débuts et fin d'appui (Oosterlinck et al., 2012).

Ainsi, le coût élevé de la technologie, son utilisation laborieuse et son manque de flexibilité ne permettent pas d'analyser la locomotion du cheval dans les circonstances d'un examen locomoteur vétérinaire.

Les outils de mesure de cinématique optique et optoélectronique

La mesure cinématique en trois dimensions détermine la position du corps dans l'espace et dans le temps. Elle s'effectue en trois dimensions par le suivi de points anatomiques repérables sur une succession d'images capturées par plusieurs caméras fixes. Cet outil apporte une quantification précise des mouvements que l'on voit. L'évolution de cette technologie est allée de pair avec l'amélioration de la résolution et de la fréquence d'échantillonnage des caméras. Aujourd'hui plus connu

sous le nom de OMC (Optical Motion Capture), le système se compose le plus souvent de caméras haute fréquence à éclairage infrarouge qui filment des marqueurs réfléchissants sphériques positionnés sur les points anatomiques d'intérêt (Figure 9). La position de ces points est déterminée selon un repère orthogonal à trois dimensions grâce à la reconstitution des différents points de vue des caméras.

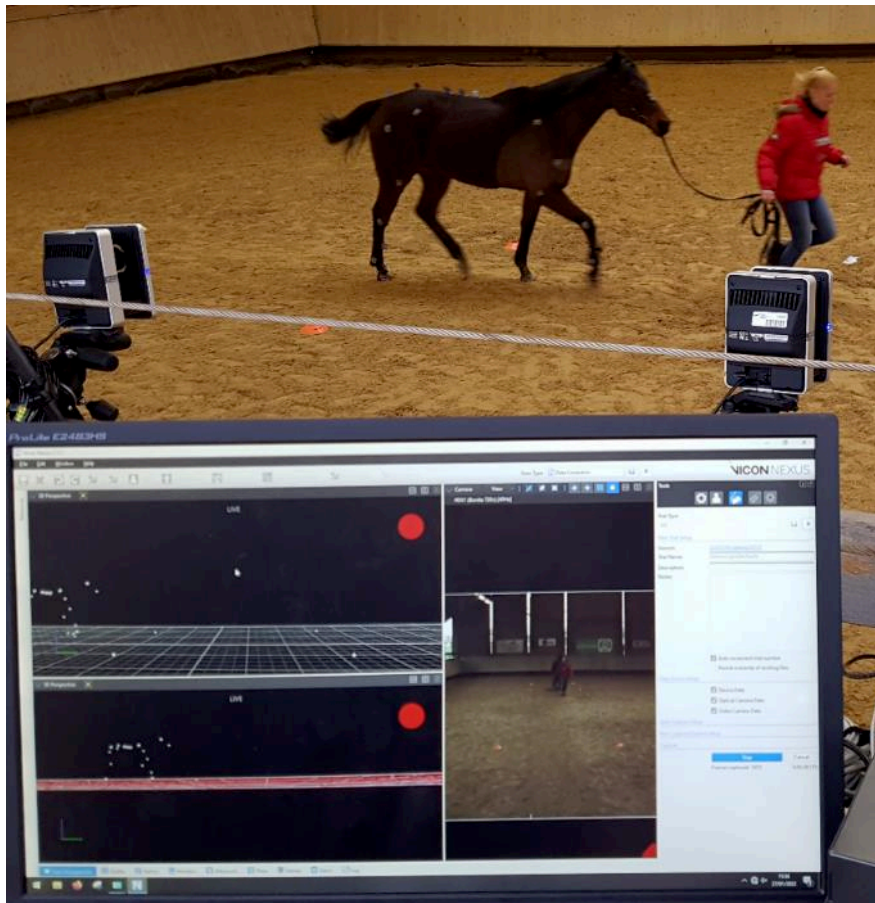


Figure 9 Photographie d'un enregistrement par un système OMC sur une ligne droite de 5 mètres de longueur sur sol souple

La calibration sur un espace défini permet d'obtenir une justesse des outils optoélectroniques de l'ordre du millimètre (Ehara et al., 1997; Eichelberger et al., 2016; Merriault et al., 2017). Les erreurs peuvent être dues au déplacement de la peau (Bogert et al., 1990), à la taille des marqueurs ou à la numérisation manuelle si le marqueur n'a pas été détecté automatiquement (Clayton, 1996).

L'analyse de la répétabilité de la mesure optique sur la tête et le dos de chevaux sains (Hardeman et al., 2019) a conclu en un coefficient de corrélation entre 0.68 et 0.85. Les tests de reproductibilité ont montré qu'une erreur de positionnement des

marqueurs de 3 cm peut compromettre la fiabilité de la détection des boîtiers (Serra Bragança et al., 2018).

L'utilisation extérieure de l'OMC est à proscrire à cause de la luminosité ne permettant pas d'identifier correctement les marqueurs. Le coût incluant les caméras et le système de traitement automatique des données est élevé. Le temps de main-d'œuvre n'est pas négligeable, comprenant la calibration, la pose des marqueurs sur le cheval et la labellisation des marqueurs mal détectés (Barrey, 1999; Clayton, 1996). Enfin, la limite d'utilisation principale de cet outil réside dans la restriction de l'espace de mesure. L'utilisation d'un tapis roulant a permis d'étudier la locomotion sur de nombreuses foulées dans des conditions standardisées (Buchner et al., 1996b; Kelmer et al., 2005; Uhlir et al., 1997). Récemment, l'installation fixe d'un outil de capture du mouvement dans des cliniques universitaires a élargi les études sur de nombreux cas pathologiques (Persson-Sjodin et al., 2023).

Les outils de mesure inertielle

Une unité de mesure inertielle ou IMU (Inertial Measurement Unit) est un composant électronique avec une technologie MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) qui mesure l'accélération selon 1 ou 3 axe(s) orthogonaux (accéléromètre), et/ou la vitesse angulaire de rotation autour d'1 ou 3 axe(s) (gyroscope). Elle peut être complétée par un magnétomètre, elle est alors désignée comme MIMU (Magneto-Inertial Measurement Unit).

Dans le cas d'une MIMU, l'orientation des capteurs peut être déduite par un algorithme de fusion des données issues des accéléromètres, des gyroscopes et des magnétomètres. Avec une batterie, une capacité de mémoire et un système de communication intégrés, leur poids atteint l'ordre du décigramme et leur taille l'ordre du cm (Figure 10). Ainsi, ils sont portatifs sans gêner la locomotion du cheval et peuvent être utilisés dans toutes les conditions.

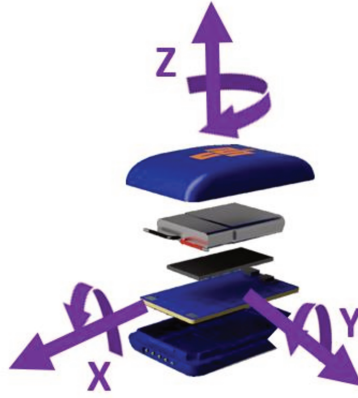


Figure 10 Illustration de la composition de centrales inertielles et ses axes de mesures d'accélération et de vitesse angulaire. (Blue Trident, Vicon®)

Les accéléromètres uni-axiaux ont été les premiers à être utilisés. L'accélération verticale du pied permet de découper les temps de foulée facilement (Back et al., 1995). Attachés au sternum, l'accélération mesurée représentait les forces appliquées au centre de gravité (Barrey et al., 1994, 1995; Barrey & Galloux, 1997; Weishaupt et al., 1993). Ils étaient aussi attachés sur la paroi du sabot afin d'étudier l'accélération brute liée aux chocs appliqués au pied lors de l'impact au sol (Lanovaz et al., 1998). L'accélération mesurée sert aussi à estimer la GRF sous le pied (Parmentier et al., 2023; Witte et al., 2004). Mais leur utilisation principale dans le domaine de la biomécanique équine est de mesurer sur le terrain les déplacements et angles mesurés avec un système OMC. Pfau et al. (2005) ont publié une méthode de calcul du déplacement vertical à partir d'IMUs placés sur le dos du cheval. Cependant la mesure inclut du bruit et cette méthode requiert une transformation du signal brut (Pfau et al., 2005).

De même que les précédents outils de mesure, la justesse du calcul du déplacement à partir d'IMUs a été évaluée avec la référence d'un système OMC. Pour les mouvements dorso-ventraux du dos, Warner et al. (2010) ont évalué 8 à 16 mm de différence et Pfau et al. (2005) ont quant à eux estimé 14% d'erreur relative. Martin (2015) a mesuré un biais de $0.002 \pm 0.25^\circ$ et de $0.08 \pm 0.35^\circ$ pour l'angle thoracique et l'angle thoracolombaire respectivement. Enfin la justesse des mouvements des membres a aussi été étudiée par Olsen et al. (2013) qui ont déterminé 5% d'erreur pour le déplacement selon l'axe cranio-caudal des membres. Sapone et al. (2021) ont conclu un biais de 4.1° pour l'angle de protraction et de 3.3° pour l'angle de rétraction

des antérieurs. De plus, une bonne corrélation existe entre les résultats obtenus à partir d'IMUs et d'une plateforme de force (Keegan et al., 2012).

Keegan et al. (2011) ont montré un intervalle de confiance de 6mm pour le déplacement dorso-ventral de la tête et 3 mm pour la croupe lors de la répétition de mesures inertielles. Sepulveda et al. (2018) ont quant à eux mesuré une médiane de différences entre les mesures répétées sur plusieurs jours à 7 mm pour la tête et à 4mm pour le pelvis.

Cependant, il existe différentes méthodes de traitement de données pour mesurer le déplacement vertical (ou dorso-ventral) du tronc. Par exemple, les mesures provenant de 2 systèmes inertiels différents montrent des limites de concordance d'environ 6.2mm (Pfau et al., 2016). De plus, les erreurs de placement des capteurs inertiels sur le pelvis et sur l'antérieur droit impactent significativement les mesures (Moorman et al., 2017).

Bien que les mesures requièrent une étape de transformation, cette technologie a permis d'étudier la locomotion du cheval dans de nombreuses conditions : sur une piste de trot (Kallerud et al., 2021), monté (Persson-Sjodin et al., 2018), dans l'eau (Hatrissé et al., 2022), sur une pente (Bailey et al., 2022). De plus, des données sur de très nombreux chevaux dans des conditions cliniques ont été enregistrées (Reed et al., 2020).

Les avantages et inconvénients des outils existants conduisent à la conclusion suivante :

→ Trois grands types d'outils de mesure existent pour quantifier l'asymétrie locomotrice. Parmi ces outils, les systèmes inertiels sont les plus adaptés à une utilisation dans des conditions cliniques.

1.3.4 Les outils disponibles sur le marché vétérinaire

Equinosis Q® avec le logiciel Lameness Locator (Equinosis®, Columbia, MO)

L'Equinosis Q® avec le logiciel Lameness Locator était autrefois le seul système inertiel disponible sur le marché vétérinaire qui intégrait le traitement des données (Figure 11). Il est répandu mondialement et particulièrement aux États-Unis. Il mesure

uniquement l'asymétrie de la tête et de la croupe, alors que des études récentes montrent l'importance des mouvements du garrot dans l'interprétation des asymétries locomotrices (Persson-Sjodin et al., 2023).

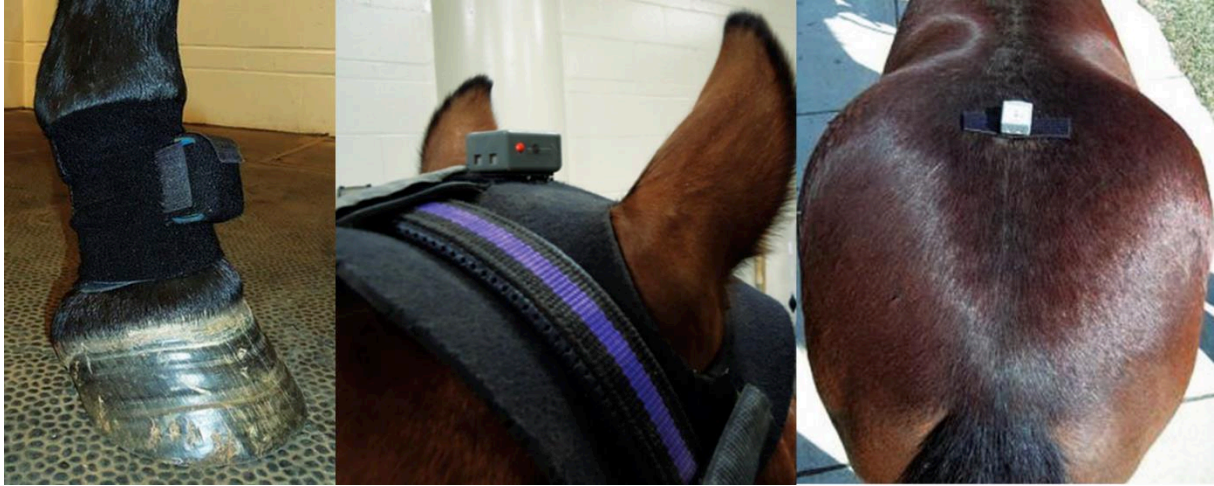


Figure 11 Le système Equinosis Q® avec le logiciel Lameness Locator (McCracken et al., 2012)

Qhorse®

À ce jour, Qhorse (Qualisys®) est un système de capture optique installé dans plusieurs cliniques vétérinaires en Europe (Persson-Sjodin et al., 2023). Ils y sont calibrés pour enregistrer dans des espaces intérieurs en ligne droite sur un sol dur et/ou dans un manège sur un sol souple. Le système traite automatiquement les enregistrements cinématiques réalisés sur les patients. Pour faciliter la reconnaissance des marqueurs et limiter le nombre de caméras, 3 marqueurs sont placés sur la tête, 3 sur le garrot et 3 sur le pelvis (Figure 12).



Figure 12 Le système Qhorse (Qualisys®). (a. Hardeman et al., 2022) ; (b. Lawin et al., 2023).

Les systèmes inertiels récemment développés

Deux autres systèmes inertiels de quantification de la locomotion ont été mis sur le marché pendant cette thèse : EquiGait® en 2021 et Equi-Pro® (Inertia Technology®) en 2023 commercialisé au terme du projet EquiMoves (Bosch et al., 2018). Ces nouveaux systèmes ont ajouté un capteur sur le garrot (Figure 13). Un dernier système se limitant à des mesures sur les membres serait en cours de développement, le « Lameness Detector 0.1 » (Crecan et al., 2022).



Figure 13 Le système EquiMoves monté (Serra Bragança et al., 2020)

Sleip®

L'outil de mesure de la boiterie développé le plus récemment, Sleip®, relève de la cinématique optique. Il se base sur la reconnaissance par intelligence artificielle de la tête et de la croupe sans marqueur à partir d'une vidéo prise par un smartphone. Sa précision sur une vue de devant et de derrière en ligne droite serait de 2mm en comparaison avec le Qhorse® (Lawin et al., 2023). La reconnaissance vidéo semble être la méthode existante la plus pratique d'utilisation pour la pratique vétérinaire et donc la plus prometteuse.

1.3.5 Limites de l'utilisation clinique des outils d'analyse de la locomotion

Une étude de satisfaction des vétérinaires réalisée par Hardeman et al. (2021) a mis en avant les contraintes techniques de mise en pratique et la difficulté d'interprétation des outils de quantification de la boiterie existants à ce jour.

Les vétérinaires sont principalement contraints par le temps (Lopes et al., 2018). La rapidité lors de la mise en place du système, de la collecte des données, de l'obtention des résultats, de leur interprétation et de leur explication au propriétaire est un critère essentiel. Par exemple, l'actuelle recommandation d'enregistrer 25 foulées minimum, nécessitant de faire trotter le cheval plus longtemps, est une contrainte. Le système doit aussi être applicable aux conditions imposées par l'examen locomoteur. Par exemple, l'électronique doit être protégée du sable et de l'humidité. Enfin, son adaptation à tous les types de chevaux, quelle que soit leur taille, leur démarche, ou leur coopération est essentielle.

En plus de ces aspects techniques, des connaissances sont à apporter aux vétérinaires pour que le système de mesure contribue à l'établissement de leur diagnostic. L'ergonomie des systèmes, l'explication des phénomènes biomécaniques enregistrés et l'affichage clair des résultats sont essentiels pour rendre ces outils utilisables en pratique courante. L'affichage graphique des résultats du logiciel Lameness Locator (Equinosis®) peut sembler complexe à comprendre pour des novices (Figure 14). Le système apporte au vétérinaire des valeurs chiffrées sur ce qu'il évalue visuellement. Pour son utilisation, les résultats de mesure doivent être facilement reliés à la référence actuelle des vétérinaires, l'évaluation visuelle. Ainsi

pour comprendre les résultats, la signification clinique associée aux valeurs chiffrées est essentielle.

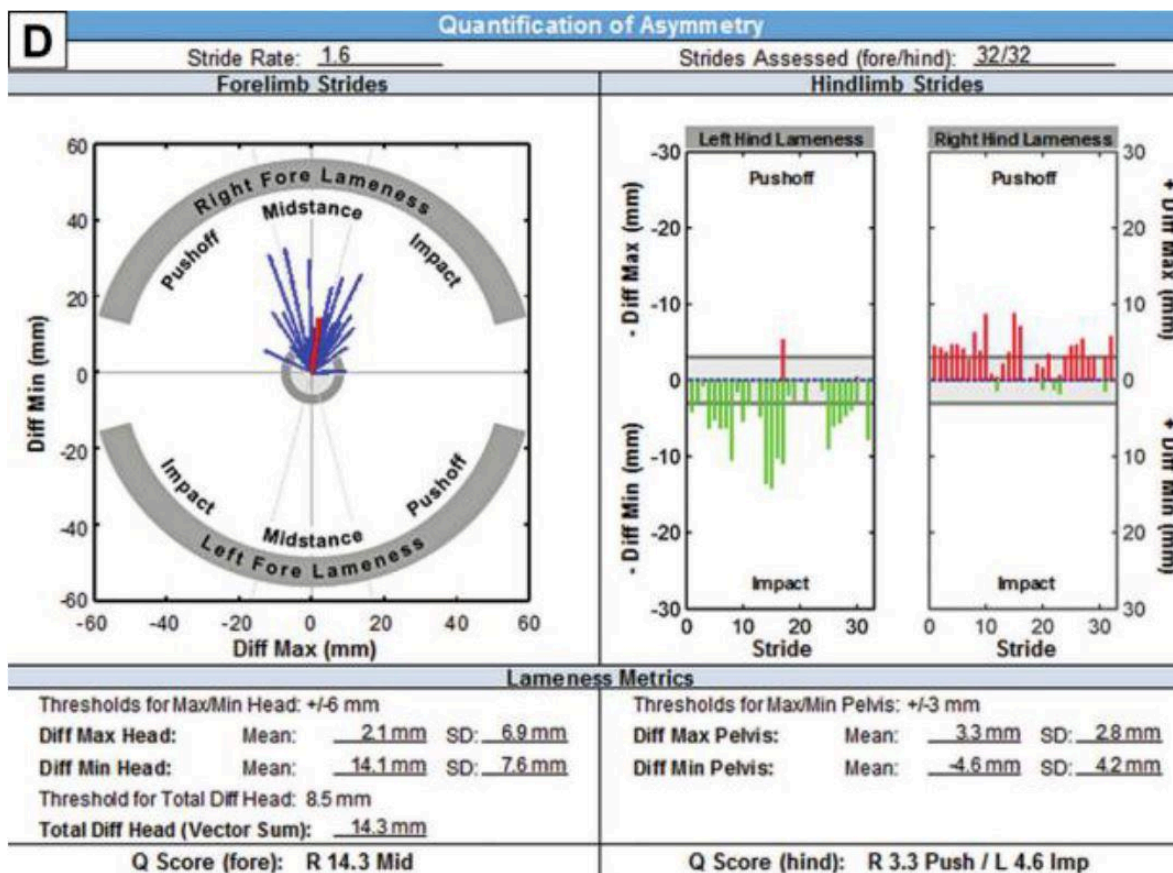


Figure 14 Exemple d'affichage graphique des résultats par le logiciel Lameness Locator (Equinosis®), système de quantification des boiteries, pour une « boiterie antérieure droite avec une boiterie de propulsion du postérieur droit et d'impact du postérieur gauche » (Reed et al., 2020).

Cette partie décrivant les outils d'analyse de la locomotion et leur avantages et inconvénients d'utilisation relevés par les vétérinaires conduit à la conclusion suivante :

➔ Les systèmes inertiels sont les outils de mesure de la locomotion les plus adaptés à une utilisation dans les conditions de la pratique vétérinaire. Cependant, les outils inertiels commercialisés restent difficiles d'interprétation pour des vétérinaires de terrain. Le développement d'un système de quantification de boiterie fiable, et facile à utiliser et à interpréter par les vétérinaires est l'objectif de cette thèse

1.4 Signification clinique de la quantification de l'asymétrie.

1.4.1 Les indices d'asymétrie indicateurs de boiterie

Définition de l'asymétrie

L'asymétrie se définit comme un défaut d'harmonie lors de la comparaison d'objets semblables de part et d'autre d'un axe. Le système locomoteur a un plan de symétrie, le plan sagittal, où chaque structure se réplique de part et d'autre de ce plan. Ainsi la comparaison des mouvements similaires à gauche et à droite permet de détecter des asymétries. Comme expliqué au Chapitre 1.2.2, la boiterie est une altération de la démarche normale due à un trouble fonctionnel ou structural dans le système locomoteur. Lors d'un trouble unilatéral, cette altération de la démarche est visible par une asymétrie de mouvement.

La symétrie des mouvements inhérents au trot facilite la détection des asymétries. De plus les manifestations de la boiterie sont plus marquées à cette allure (Christovão et al., 2008). C'est pourquoi le trot est l'allure incontournable dans la détection des boiteries.

L'asymétrie peut être quantifiée par différents indices tant que les mêmes mesures prises à droite et à gauche sont comparées. Ainsi des indices d'asymétrie provenant des différents outils de mesure ont été étudiés dans l'objectif de quantifier la boiterie.

L'asymétrie des forces

L'asymétrie des forces verticales s'appliquant sous le pied a été étudiée. La symétrie de force mesurée entre les 2 antérieurs et les 2 postérieurs chez des chevaux sains a d'abord été vérifiée (Merkens et al., 1993). Après l'induction d'une boiterie sur un membre, une diminution du maximum et de l'aire sous la courbe de la composante verticale de la force de réaction du sol (GRF) est constatée sur le membre induit par rapport au membre contralatéral (Clayton et al., 2000; Gingerich et al., 1979; Ishihara et al., 2005; Merkens et al., 1988). La Figure 15 représente la GRF mesurée chez un cheval sain et celle mesurée après induction de la boiterie. Dans l'objectif de détecter la boiterie avec une meilleure sensibilité, d'autres méthodes de calcul d'indices ont été proposées. Un indice combinant la durée et l'amplitude des pics de force a été développé par Merkens et al. (1988). De même, un indice comprenant la valeur et

l'angle d'un vecteur moyen de force a été testé par Hobbs et al. (2018). Selon Dow et al. (1991), la mesure de la force permettrait de détecter précocement les lésions.

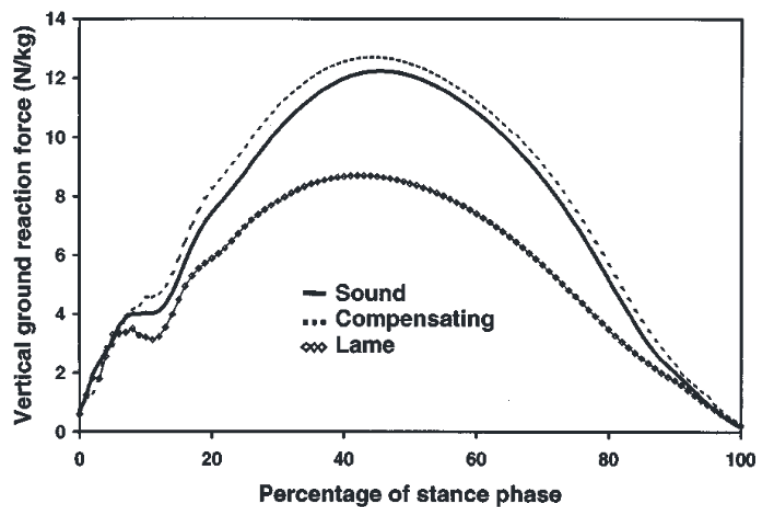


Figure 15 Graphique de la force verticale de réaction du sol en N/kg au cours de la phase d'appui. La courbe en trait plein est celle symétrique des antérieurs d'un cheval ne présentant pas de boiterie. Les courbes en pointillés sont celles des antérieurs d'un cheval avec une boiterie induite. Les gros pointillés représentent le membre induit et les fins pointillés le membre contralatéral sain (Clayton et al., 2000).

L'asymétrie des mouvements des membres

Le temps d'appui du membre boiteux est allongé (Galisteo et al., 1997), réduit (Christovão et al., 2008; Deuel et al., 1995) ou inchangé (Buchner et al., 1995; Moorman et al., 2013) en fonction des études l'analysant. Cependant la phase de suspension (durée lors de laquelle aucun pied ne touche le sol) est fréquemment raccourcie entre la fin d'appui du membre atteint et le début d'appui du membre sain (Buchner et al., 1995; Weishaupt, 2008). Enfin les angles des articulations proximales sont plus souvent affectés par la boiterie que les angles des articulations distales (Audigié et al., 2001).

Les mouvements du tronc

La boiterie est décrite par les vétérinaires comme des mouvements de la tête ou du pelvis plus prononcés lors de l'appui sur le membre sain (Starke & May, 2022a). Ainsi l'objectif des études est de mesurer cette exacerbation du mouvement déclenchée par

les boiteries antérieures et postérieures (Buchner et al., 1996a; May & Wyn-Jones, 1987).

Au trot, le mouvement vertical du tronc du cheval au cours du temps est décrit comme une sinusoïde (Peham et al., 1996). Cette courbe sinusoïdale est formée par la succession de minima relatifs à l'appui et de maxima relatifs à la propulsion sur chaque diagonal. Une foulée de trot comprend donc 2 minima et 2 maxima, puisque les diagonaux sont les appuis simultanés de l'antérieur droit (AD) avec le postérieur gauche (PG), et de l'antérieur gauche (AG) avec le postérieur droit (PD). Ainsi un cheval sain aurait une locomotion symétrique entre les 2 diagonaux, et présenterait donc une sinusoïde parfaite (Peham et al., 1996). La Figure 16 et la Figure 17 montrent les événements d'une foulée de trot en lien avec la courbe sinusoïdale du déplacement dorso-ventral du tronc. Les minima de la tête, du garrot et de la croupe sont temporellement proches, comme pour leurs maxima. De même, les appuis des membres diagonaux sont presque synchrones.

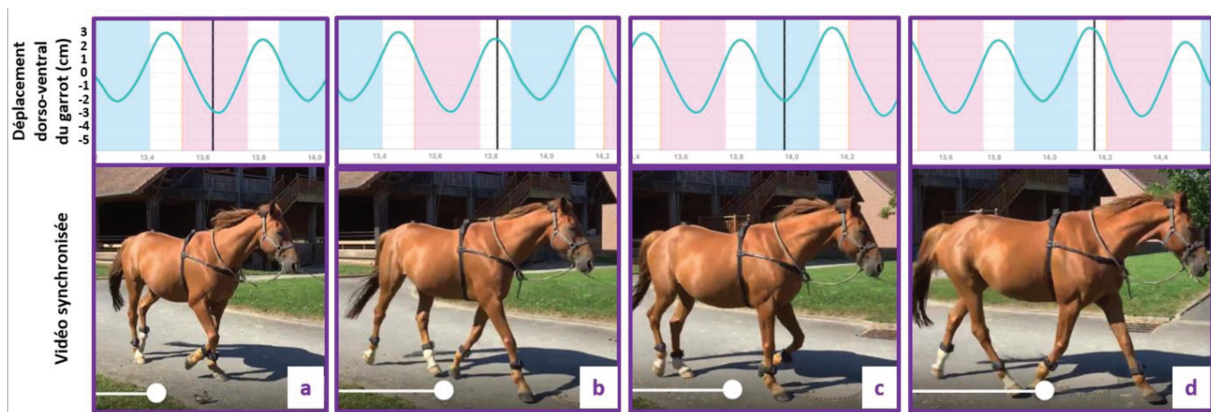


Figure 16 Courbe sinusoïdale du déplacement dorso-ventral du garrot en cm (courbe bleue) au cours du temps (secondes) pendant une foulée de trot, avec l'image synchronisée. Les temps où l'antérieur gauche (AG) est à l'appui (rectangle rose) et celui où l'antérieur droit (AD) est à l'appui (rectangle bleu) sont renseignés. a) lors de la mise en charge sur l'AG, le garrot atteint une altitude minimale ; b) après la propulsion par l'AG le garrot atteint une altitude maximale ; c) lors de la mise en charge sur l'AD, le garrot atteint une altitude minimale ; d) après la propulsion par l'AD le garrot atteint une altitude maximale.

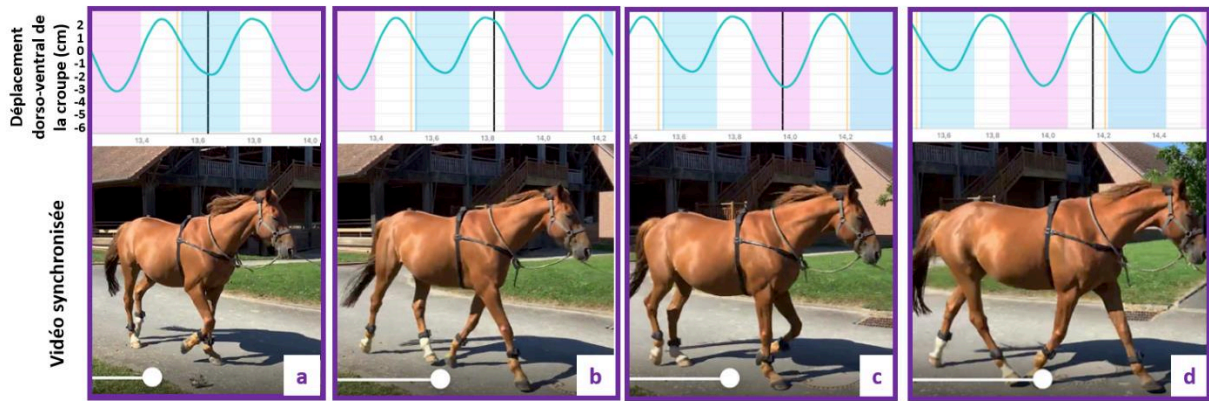


Figure 17 Courbe sinusoïdale du déplacement dorso-ventral de la croupe en cm (courbe bleue) au cours du temps (secondes) pendant une foulée de trot, avec l'image synchronisée. Les temps où le postérieur gauche (PG) est à l'appui (rectangle rose) et celui où le postérieur droit (PD) est à l'appui (rectangle bleu) sont renseignés. a) lors de la mise en charge sur le PG, la croupe atteint une altitude minimale ; b) après la propulsion par le PG la croupe atteint une altitude maximale ; c) lors de la mise en charge sur le PD, la croupe atteint une altitude minimale ; d) après la propulsion par le PD la croupe atteint une altitude maximale.

Les indicateurs des boiteries antérieures

Weishaupt et al. (1993) et Barrey et al. (1994) ont remarqué une moindre accélération verticale de la tête et du tronc lors de l'appui de l'antérieur boiteux. La différence relative des accélérations mesurées entre l'appui de l'antérieur droit et l'appui de l'antérieur gauche est le premier indice d'asymétrie des mouvements du tronc proposé (Kübber et al., 1994; Uhlir et al., 1997). Un indice basé sur l'autocorrélation des courbes d'accélération des demies foulées droite et gauche a aussi permis de mesurer l'asymétrie présente lors de boiteries antérieures (Barrey et al., 1994; Biau & Barrey, 2004; Weishaupt et al., 2001).

Buchner et al. (1996a) décrivent que l'induction d'une boiterie antérieure provoque une diminution de l'amplitude verticale de la tête. Le déplacement vertical du garrot montre aussi une diminution d'amplitude sur le membre atteint (Buchner et al., 1996a). Différents indices ont été développés afin de quantifier cette asymétrie par une valeur chiffrée.

La transformée de Fourier a servi principalement à calculer la fréquence de foulée (Barrey et al., 1994, 1995), puis à retirer les mouvements parasites de la tête (Keegan et al., 2001), avant d'être à l'origine d'un premier indice de symétrie basé sur le déplacement, décrit ci-après (Audigié et al., 2002). Comme illustré dans la Figure 18,

la courbe de déplacement vertical se compose d'une sinusoïde ayant la fréquence d'une foulée et d'une sinusoïde ayant la fréquence d'une demi-foulée. La première représente la composante asymétrique de la foulée (pathologique) et la seconde est une courbe d'une foulée parfaitement symétrique (composante saine). Ainsi un ratio d'énergie (ER) peut être calculé sur l'amplitude de ces composantes (ou harmoniques) (Audigié et al., 2002; Keegan et al., 2001; Kelmer et al., 2005; Kramer et al., 2004). L'ajout de l'amplitude d'une 3^{ème} sinusoïde aux deux premières améliore les modèles de prédiction de la GRF (Roepstorff et al., 2022).

La transformée de Fourier permet le calcul d'un indice complémentaire, Phi, l'angle de déphasage temporel entre les 2 composantes sinusoïdales du signal. Phi est un indicateur sur le membre source de la boiterie (Audigié et al., 2002), mais est aussi un indicateur temporel du signal. La dimension temporelle des courbes continue d'être explorée pour la détection de la boiterie. Persson-Sjodin et al. (2023) ont montré un maximum atteint par la tête avancé par rapport au maximum atteint par le garrot.

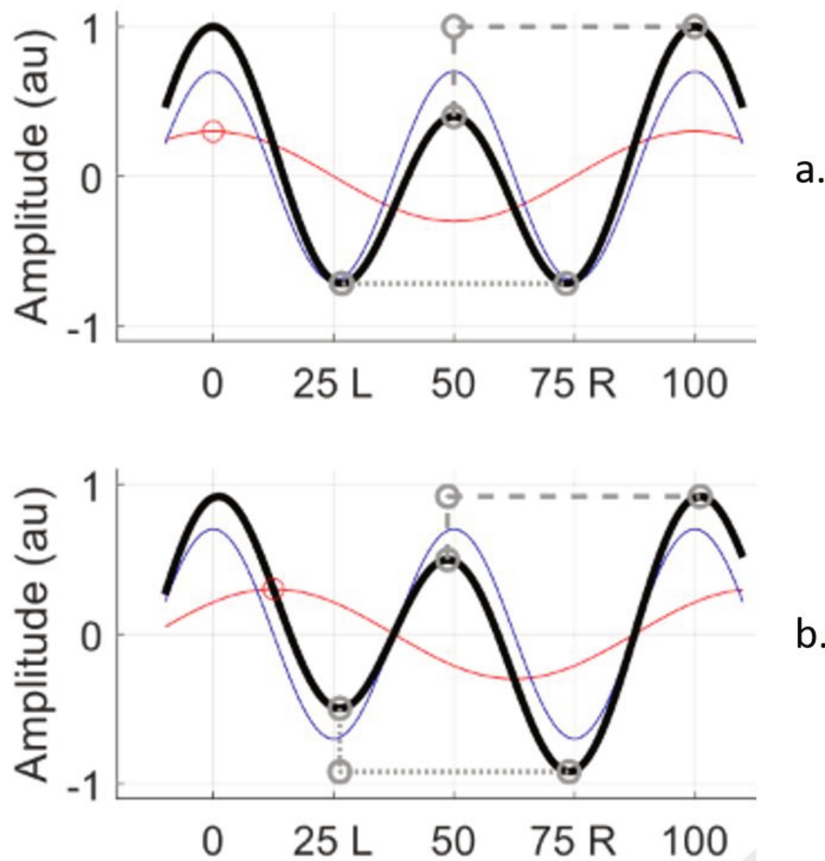


Figure 18 Deux exemples théoriques (a. et b.) de foulées asymétriques avec les appuis des pieds gauche (L) et droit (R), basés sur un modèle harmonique à 2 composants. La courbe noire est le déplacement vertical modélisé ou la somme de la courbe bleue (harmonique 1 ou composante pathologique) et de la courbe rouge (harmonique 2 ou composante saine). Le déphasage temporel $\Phi = 0$ pour le modèle a. et $\Phi = -45^\circ$ pour le modèle b. (Roepstorff et al., 2022)

D'autres indices traduisant une asymétrie d'amplitude de la courbe de déplacement dorso-ventral de la tête ont été retenus en se basant sur les minima et maxima des courbes (Rhodin et al., 2013; Robartes et al., 2013). Ainsi la différence en millimètres entre les minima atteints lors des appuis des antérieurs gauche et droit est nommée « HDmin » (Rhodin et al., 2013), « MinDiff » (Pfau et al., 2014), « Min_diff » (Bosch et al., 2018) ou « diffmin » (Radtke et al., 2020). De même, la différence entre les maxima atteints après la propulsion sur les antérieurs gauche et droit porte des noms similaires incluant des « Max ». L'indice « diffUp » compare l'amplitude du minimum au maximum pendant la propulsion sur chaque antérieur (Starke et al., 2012). L'indice « diffDown » compare l'amplitude du maximum au minimum pendant la chute puis

amortissement sur chaque antérieur. La Figure 19 reprend le schéma d'explication de ces indices.

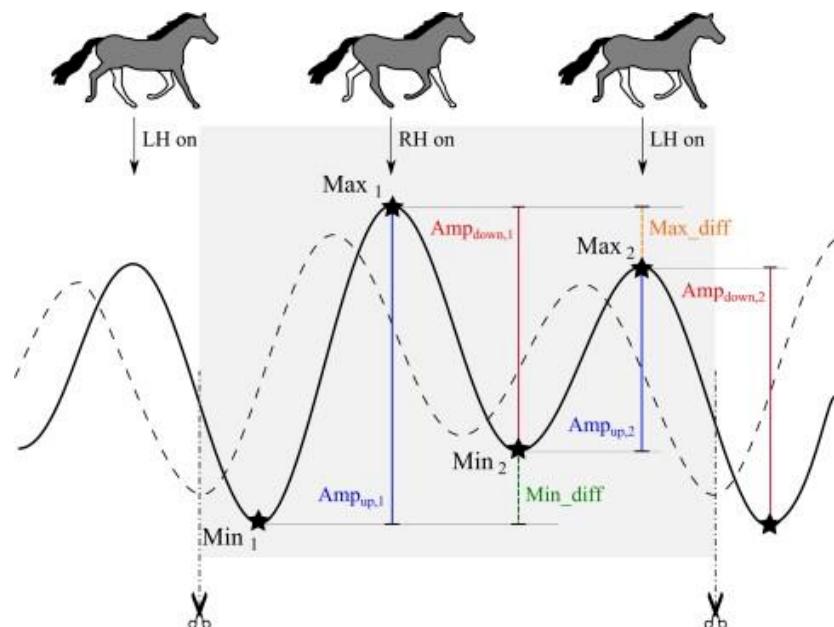


Figure 19 Représentation des variables issues de la courbe du déplacement dorso-ventral du tronc analysées dans les études sur la boiterie (Starke et al., 2012)

Les indicateurs des boiteries postérieures

Bien que le « pelvis hike » est décrit lors du début d'appui du postérieur boiteux, les études montrent une descente de la croupe moins basse lors de la mise en charge sur le postérieur boiteux, et une remontée moins haute après propulsion sur le membre boiteux (Buchner et al., 1996a). Ce phénomène a été mis en évidence après induction de la boiterie (Buchner et al., 1996a; Kramer et al., 2004; McCracken et al., 2012). Ainsi, à l'instar de la tête pour les boiteries antérieures, le déplacement dorso-ventral du pelvis est traité de la même façon pour quantifier l'asymétrie postérieure (Pfau et al., 2014). Deux points anatomiques du pelvis peuvent être étudiés. Le déplacement du tuber sacrale est comparé entre les 2 demi-foulées, et indépendamment l'amplitude de déplacement du tuber coxae droit est comparé à celle du tuber coxae gauche (Pfau et al., 2007; Starke et al., 2012).

Interactions et mouvements compensatoires

Une asymétrie des déplacements verticaux de la tête est aussi observée lors d'une boiterie postérieure (Maliye et al., 2015; Persson Sjödin et al., 2016; Rhodin et al.,

2013; Uhlir et al., 1997). De même, de sévères boiteries antérieures provoquent une asymétrie des mouvements de la croupe (Rhodin et al., 2018). Le garrot joue alors un rôle essentiel sur la discrimination d'une boiterie antérieure et postérieure (Persson-Sjodin et al., 2023; Rhodin et al., 2018). La Figure 20 montre qu'une asymétrie de tête peut être autant due à une boiterie antérieure que postérieure, mais que le garrot présente des courbes différentes. Cette différenciation est essentielle car l'objectif de l'examen locomoteur dynamique est d'identifier le membre atteint.

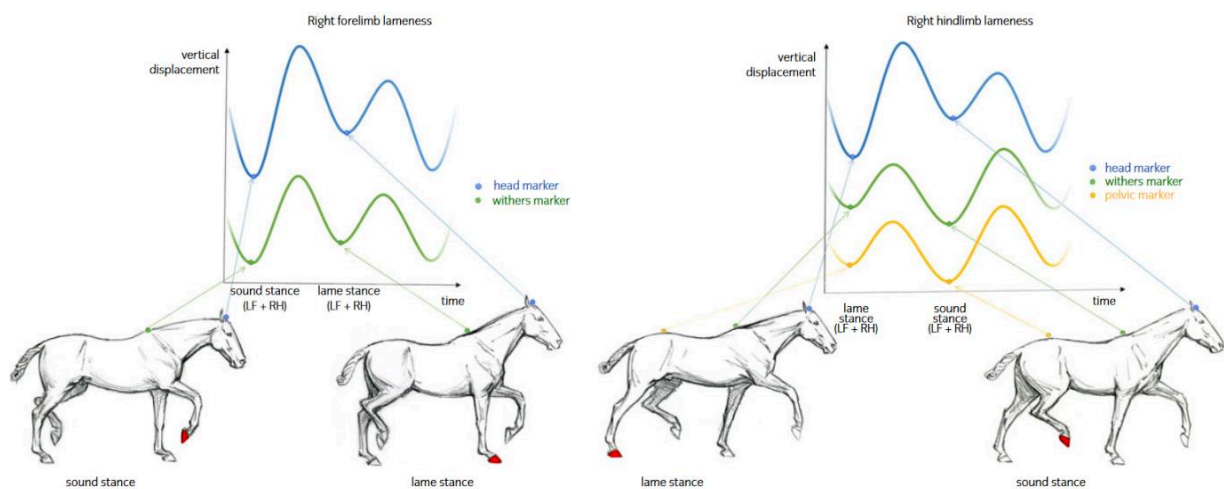


Figure 20 Illustration des mouvements compensatoires lors d'une boiterie postérieure au trot. Le déplacement vertical de la tête et du garrot lors d'une boiterie antérieure induite et le déplacement vertical de la tête, du garrot et de la croupe lors d'une boiterie postérieure induite sont représentés au cours d'une foulée. Le membre induit est indiqué en rouge (Rhodin et al., 2018).

Ces mouvements compensatoires sont à différencier d'une boiterie multiple, qui est la manifestation de lésions douloureuses sur plusieurs membres. Par exemple, il n'est pas rare qu'une boiterie d'un membre prédispose le membre diagonal contralatéral à des lésions et engendre une boiterie multiple (Ross & Dyson, 2011). Le second objectif de l'examen locomoteur étant d'identifier les autres membres pathologiques s'il y en a, il est essentiel de différencier les mouvements compensatoires des boiteries multiples.

Les études portant sur l'asymétrie lors de boiterie dessinent la conclusion suivante :

→ Les indices d'asymétrie sont des indicateurs de boiterie. La pertinence des indices proposés est toujours en étude (Pfau et al., 2022). Les outils de

quantification des boiteries sont une aide aux objectifs de l'examen locomoteur, c'est-à-dire à l'identification du membre le plus atteint et à la détection d'autres membres atteints.

1.4.2 L'asymétrie chez des chevaux sains

Définir un cheval « sain » du point de vue de sa locomotion peut être sujet à de grandes variations d'interprétation. Selon le cavalier, un cheval sain performe au niveau demandé et ne montre aucune réticence à réaliser les exercices qu'il maîtrise. Cependant parmi des chevaux considérés comme sains par leur cavalier, la majorité n'est pas considérée sans boiterie apparente par un vétérinaire. En effet, 275 chevaux sont considérés sans boiterie par un vétérinaire sur 506 chevaux considérés sains par leur propriétaire (Greve & Dyson, 2014). Trois autres études confirment la différence de la définition d'un cheval sain entre propriétaires et vétérinaires avec les proportions suivantes : 14/57 (Dyson & Greve, 2016) ; 3-4/12 (Bragança et al., 2020) ; et 25/235 (Müller-Quirin et al., 2020). Ainsi du point de vue du vétérinaire, la définition d'un cheval sain est un cheval ne présentant aucune anomalie de démarche sur l'ensemble des conditions de l'examen locomoteur. Dans tous les cas il existe une part de subjectivité, car la présence de la manifestation douloureuse d'une lésion dépend de l'activité du cheval et du niveau de sollicitation de son appareil locomoteur (Barrey & Desbrosse, 1996; Hoogmoed et al., 2003). La définition d'un cheval sain prend toute son importance lors d'une consultation d'expertise qui peut être réalisée avant la vente d'un cheval. L'asymétrie de la démarche du cheval lors de l'examen dynamique est une partie importante de ce type de consultation (Werner, 2012).

Lors de mesure objective au trot en ligne droite, non seulement les chevaux considérés sains selon les propriétaires présentent une grande variation d'asymétrie (Pfau et al., 2016; Rhodin et al., 2017), mais aussi ceux considérés sains par les vétérinaires (Greve et al., 2017; Hardeman et al., 2019; Kallerud, et al., 2021; MacKechnie-Guire & Pfau, 2021; Scheidegger et al., 2022). Plusieurs hypothèses ont été émises. Cette variation s'expliquerait par une variabilité biologique ou par une préférence de côté (latéralité) ou par des lésions subcliniques non diagnostiquées. Persson-Sjodin et al. (2019) mettent en doute cette dernière hypothèse, car l'administration d'anti-inflammatoires ne réduirait pas cette asymétrie. Cette asymétrie physiologique a été

mesurée chez des chevaux de haut niveau (Pfau et al., 2022; Scheidegger et al., 2022), sur différentes races (Greve & Dyson, 2016; Kallerud et al., 2021; Pfau et al., 2022; Sepulveda Caviedes et al., 2018), et chez de jeunes chevaux (Drevemo et al., 1987; Kallerud et al., 2021; Kallerud et al., 2021; Zetterberg et al., 2023), bien qu'il n'y aurait pas de lien avec l'âge (Pfau et al., 2016).

De façon évidente, l'asymétrie mesurée chez des chevaux sains se déplaçant sur un cercle est plus prononcée et plus variable qu'en ligne droite (Greve & Dyson, 2016; Pfau et al., 2022; Rhodin et al., 2013; Starke et al., 2012). En effet, un cheval trottant sur un cercle exécute des mouvements physiologiquement asymétriques pour tourner. L'asymétrie physiologique générée par ce mouvement en cercle est par ailleurs dépendante de la vitesse, du rayon et de l'angle d'inclinaison du corps par rapport à la verticale (Greve et al., 2018; Pfau et al., 2012).

Les résultats des mesures de l'asymétrie sur des chevaux considérés comme sains amènent la conclusion suivante :

→ Il existe une asymétrie physiologique et elle se montre variable.

1.4.3 Seuils de détection de la boiterie

L'objectif premier d'un examen locomoteur dynamique est de déterminer si le cheval est sain ou s'il présente une anomalie. Ainsi il est essentiel pour un système de quantification des boiteries de discriminer une asymétrie physiologique et pathologique. Il est donc essentiel de déterminer des seuils de discrimination entre les valeurs d'asymétrie physiologiques et pathologiques.

Ces seuils ont été établis pour le système Equinosis Q® avec le logiciel Lameness Locator par McCracken et al. (2012) pour les différences de minima et de maxima de la tête (6 mm) et de la croupe (3 mm) en citant trois articles (Keegan et al., 2004, 2011; Kramer et al., 2004). Les valeurs semblent avoir été déterminées à partir de l'intervalle de confiance à 95% de la variabilité de l'asymétrie mesurée entre 2 répétitions chez 236 chevaux (Keegan et al., 2011). Depuis, ces seuils ont été largement utilisés dans la littérature pour définir un cheval symétrique (Hammarberg et al., 2016; Heim et al., 2016; Kallerud et al., 2021; Maliye et al., 2015; Pfau et al., 2016; Reed et al., 2020; Rettig et al., 2016; Rettig & Lischer, 2016; Rhodin et al., 2016, 2018).

L'équivalence de ces seuils a été estimée pour la mesure avec un autre système inertiel (MTx®) qui mesure le déplacement vertical, tandis que l'Equinosis Q® avec le logiciel Lameness Locator mesure le déplacement dorso-ventral (Pfau et al., 2016). Ainsi une différence de minima ou de maxima de la tête supérieure à 6 mm (Equinosis Q®) ou à 7 mm (MTx®) serait une asymétrie liée à une boiterie antérieure. Et une différence de minima ou de maxima du pelvis supérieure à 3 mm (Equinosis Q®) ou à 4mm (MTx®) serait une asymétrie liée à une boiterie postérieure. Le besoin d'une équivalence de ces seuils est exprimé pour d'autres outils de mesure comme les systèmes OMC (Müller-Quirin et al., 2020).

Ces seuils sont cependant controversés, car ils sont très sensibles, mais peu spécifiques. En effet, de très nombreux chevaux considérés sains ont une asymétrie supérieure à ces seuils (Kallerud et al., 2021; MacKechnie-Guire & Pfau, 2021; Rhodin et al., 2017). De plus, Hardeman et al. (2019) trouvent des valeurs de répétabilité supérieure à celles de Keegan et al. (2011) utilisées pour établir ces seuils. La méthode est donc discutable, car un intervalle de confiance n'est pas un seuil. Les valeurs fournies dans la littérature ne semblent donc pas adaptées à l'usage souhaité en clinique. Il convient de les réévaluer avec des méthodes adaptées en prenant en compte sensibilité et spécificité. Leur spécificité est non seulement essentielle lors des consultations d'expertise, mais aussi pour limiter du temps, du coût et du stress lors d'un diagnostic de boiterie. La sensibilité reste aussi essentielle dans l'objectif d'un diagnostic précoce des lésions. Face au manque de spécificité des seuils précédemment établis, Pfau et al. (2020) ont quant à eux déterminé des seuils en privilégiant la spécificité pour le dépistage des boiteries chez les Pur-Sang. Leur échantillon était cependant limité à 25 chevaux.

Enfin ces seuils ne sont pas applicables sur le cercle (Hardeman et al., 2019). En effet, les moyennes des valeurs mesurées sur une population de chevaux sains sur le cercle sont supérieures aux seuils établis sur la ligne droite (Hardeman et al., 2019; Pfau et al., 2016; Rhodin et al., 2016; Starke et al., 2012). Pourtant cette condition de l'examen locomoteur est importante dans l'aide à la localisation de la lésion, mais surtout, car une boiterie peut s'y révéler (Dyson & Greve, 2016). Dans le but d'utiliser le système en clinique comme système de détection des boiteries, il est donc essentiel d'étendre le calcul des seuils à la locomotion en cercle.

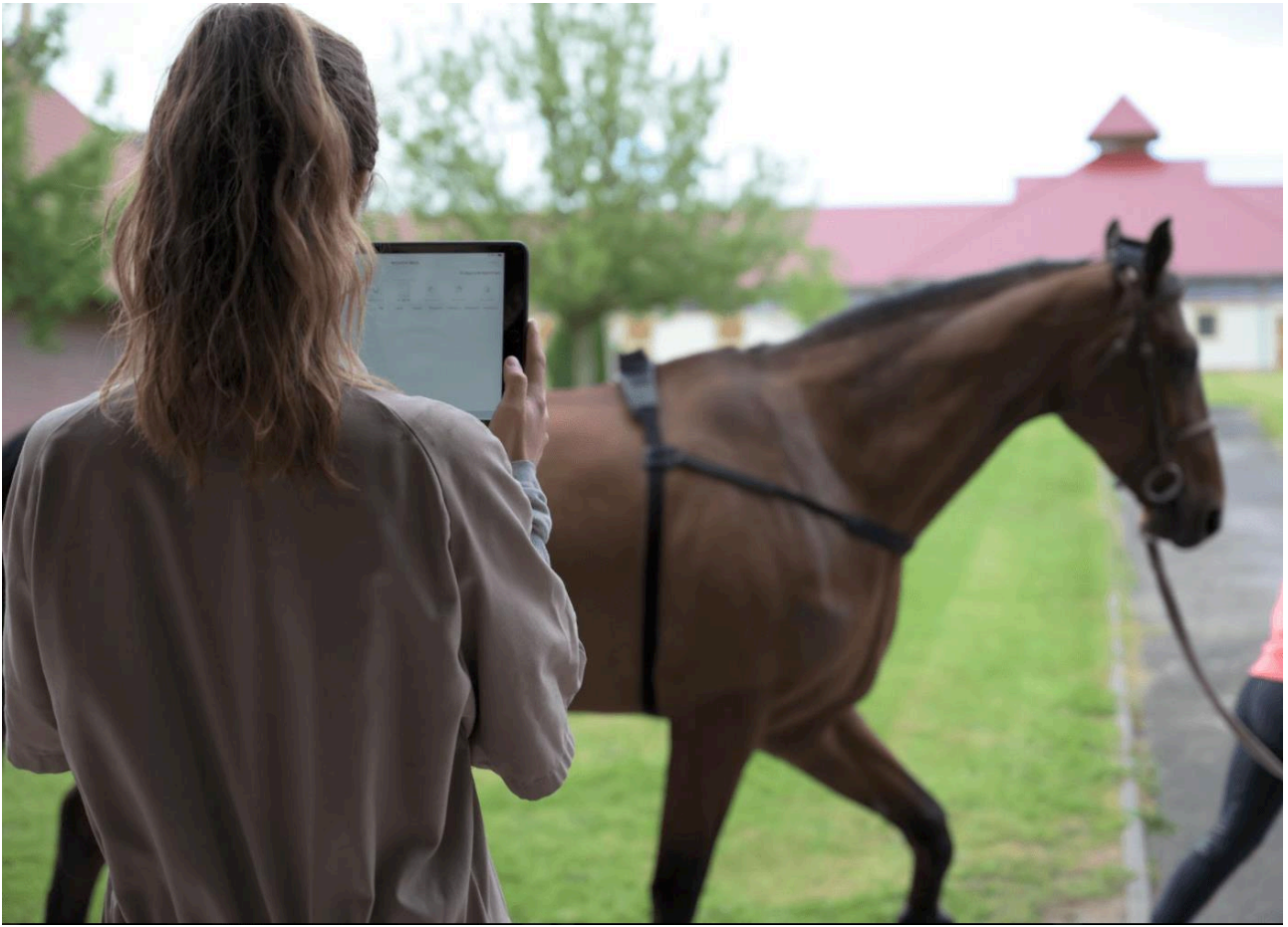
Ainsi de nombreux débats ont lieu sur la place de l'asymétrie dans la définition de la boiterie (Adair et al., 2018; Byström et al., 2020; Dyson, 2014; Pfau & Roepstorff, 2013; Serra Bragança et al., 2018; Weeren et al., 2018). Ces chercheurs et cliniciens s'accordent à dire que l'asymétrie est certes un indicateur de la boiterie, mais que la boiterie n'est pas une notion binaire et qu'une « zone grise » existe où la définition de la boiterie n'est pas évidente. C'est pourquoi il est essentiel d'associer une sensibilité et une spécificité aux seuils d'asymétrie pour la détection des boiteries.

L'ensemble de ces études montrent les limites de la relation entre la boiterie et l'asymétrie:

→ La complexité de la détection de la boiterie vient de la diversité des locomotions rencontrées chez des chevaux sains et de la diversité des manifestations pathologiques. Ainsi des seuils pour chaque indice d'asymétrie accompagnés de leur sensibilité et spécificité seraient une aide à la détection des boiteries. L'établissement de ces seuils concerne autant la locomotion en ligne droite et que la locomotion sur le cercle.

1.5 Conclusion et problématique générale

Les outils de quantification de boiterie existants ne correspondent pas tout à fait aux exigences des conditions de la pratique vétérinaire sur le terrain. Ainsi ce travail consiste à développer un outil utilisable, fiable et interprétable en pratique vétérinaire courante, puis de mesurer son exactitude afin d'identifier les limites de ses mesures. Dans un objectif de détection des boiteries, l'étude d'une population saine est le prérequis. Des seuils d'asymétrie associés à leur sensibilité et spécificité à détecter les boiteries apporteront une aide à l'interprétation des valeurs. Ils sont autant essentiels pour l'évaluation du trot en ligne droite que pour la locomotion en cercle.



CHAPITRE 2

OBJECTIFS DE LA THESE

Ce projet a été réalisé dans le cadre d'un contrat Cifre (N° 2019/1900) avec l'implication conjointe d'une équipe pluridisciplinaire, regroupant les trois entités suivantes :

- Le groupe LIM, rassemblant plusieurs pôles d'activité : un pôle de conception de selles de sport et de matériel d'équitation haut de gamme mondialement connues comme CWD, Butet et Devoucoux ; un pôle de tannerie ; et un pôle dans la santé équine comprenant la société Arioneo et les laboratoires Audevard, Ravene et EnviroEquine. Le pôle R&D étant initialement axé sur des projets d'équitation connectée, ce projet lui a permis d'innover dans le domaine vétérinaire. Arioneo, une société spécialisée dans la collecte et l'analyse des données de performance et de santé des chevaux athlètes et intégrée au groupe en 2021, commercialise aujourd'hui EQUISYM®, un système de quantification des boiteries à destination des vétérinaires.
- Le Laboratoire de Biomécanique et Pathologie Locomotrice du Cheval (BPLC) de l'Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort (EnvA) dont les travaux portent sur la biomécanique équine (Chateau et al., 2013). Ce travail a été codirigé par le Pr Henry Chateau, du Laboratoire de Biomécanique et Pathologie Locomotrice du Cheval, qui a apporté des compétences scientifiques complémentaires basées sur une longue expérience de la biomécanique équine ainsi qu'une approche clinique. Les connaissances apportées par ce travail sont en effet transférées à la communauté vétérinaire pour mieux diagnostiquer et soigner les pathologies locomotrices du cheval.
- Le Laboratoire de BioMécanique et BioIngénierie (BMBI, UMR 7338) de L'université de Technologie de Compiègne (UTC) dont les travaux portent sur la biomécanique du vivant et l'ingénierie de la santé. Le Pr Frédéric Marin a assuré la co-direction de ce travail au sein du BMBI et a apporté ses compétences scientifiques complémentaires dans le domaine de la caractérisation et modélisation biomécanique (Marin, 2020). Ce projet a permis au laboratoire d'exploiter et compléter ses compétences dans les méthodes d'acquisition, d'analyse et de traitement des données expérimentales, acquises dans un contexte original.

2.1 Objectifs de développement

Cette thèse CIFRE est réalisée avec l'ENVA, l'UTC et l'entreprise LIM France, dont le pôle de recherche et développement a pour objectif l'amélioration de la performance du cheval athlète dans le respect de son bien-être, sa santé et son intégrité physique. Cette thèse a donc un double objectif de développement et de recherche. Le premier objectif de cette thèse est le développement d'un outil de quantification de la boiterie chez le cheval à destination des vétérinaires, avec des contraintes d'utilisation réduites en comparaison de celles des outils existants énoncées au Chapitre 1.3.5. L'outil, dénommé EQUISYM®, est commercialisé depuis décembre 2021. À ce jour 16 systèmes sont utilisés par des clients vétérinaires, et 23 systèmes servent à suivre la locomotion de chevaux destinés à concourir aux Jeux Olympiques 2024. L'asymétrie de plus d'un millier de chevaux a été mesurée avec le système.

2.1.1 Présentation d'EQUISYM®

Le système est composé de 7 capteurs inertiels et leurs attaches à positionner sur le cheval, d'une tablette de commande et de visualisation, et d'une valise de rangement et de recharge (Figure 21).



Figure 21 L'ensemble des équipements du système EQUISYM®

Trois capteurs sont positionnés sur la tête, le garrot et la croupe et quatre sur la face crâniale de la partie distale du canon de chaque membre. Les capteurs sont composés d'accéléromètres triaxiaux mesurant l'accélération avec une limite à 16g et de gyroscopes triaxiaux mesurant la vitesse angulaire avec une limite à 2000°/seconde, échantillonnées à une fréquence de 200Hz. Ces données sont enregistrées sur le cheval au cours d'un examen locomoteur dynamique.

L'algorithme de traitement des données calcule des indices d'asymétrie de la locomotion au trot. Le traitement suit les étapes suivantes : la synchronisation de l'acquisition des données délivrées par les 7 capteurs ; la sélection des zones de trot ; la vérification de la figure réalisée pendant ce trot ; la détection des débuts et fins d'appui des 4 membres (Hatrissé, Macaire, et al., 2022) ; le calcul du déplacement dorso-ventral par la double intégration de l'accélération pour la tête, le garrot et la croupe ; la segmentation du déplacement dorso-ventral en foulées ; et le calcul des indices d'asymétrie pour chaque foulée.

Trois indices d'asymétrie issus des courbes de déplacements dorso-ventrales de la tête, du garrot et de la croupe sont affichés dans l'application. Ces indices sont exprimés en pourcentage, car ils sont normalisés par rapport à l'amplitude dorso-ventrale maximale. L'Amplitude d'élévation dorso-ventrale est la différence relative entre les appuis gauche et droit des amplitudes dorso-ventrales entre le minimum atteint lors de la mise en charge sur le membre et le maximum atteint après propulsion sur ce membre. Le Min est la différence relative gauche-droite des minima atteints lors de la mise en charge sur le membre. Le Max est la différence relative gauche-droite des maxima atteints après propulsion sur le membre. La Figure 22 illustre les variables extraites de la courbe de déplacement dorso-ventral qui permettent le calcul de ces indices d'asymétrie, lui-même détaillé à l'Équation 1. Ces indices d'asymétrie sont applicables à la tête et au garrot en relation avec les appuis des antérieurs, et à la croupe en relation avec les appuis des postérieurs.

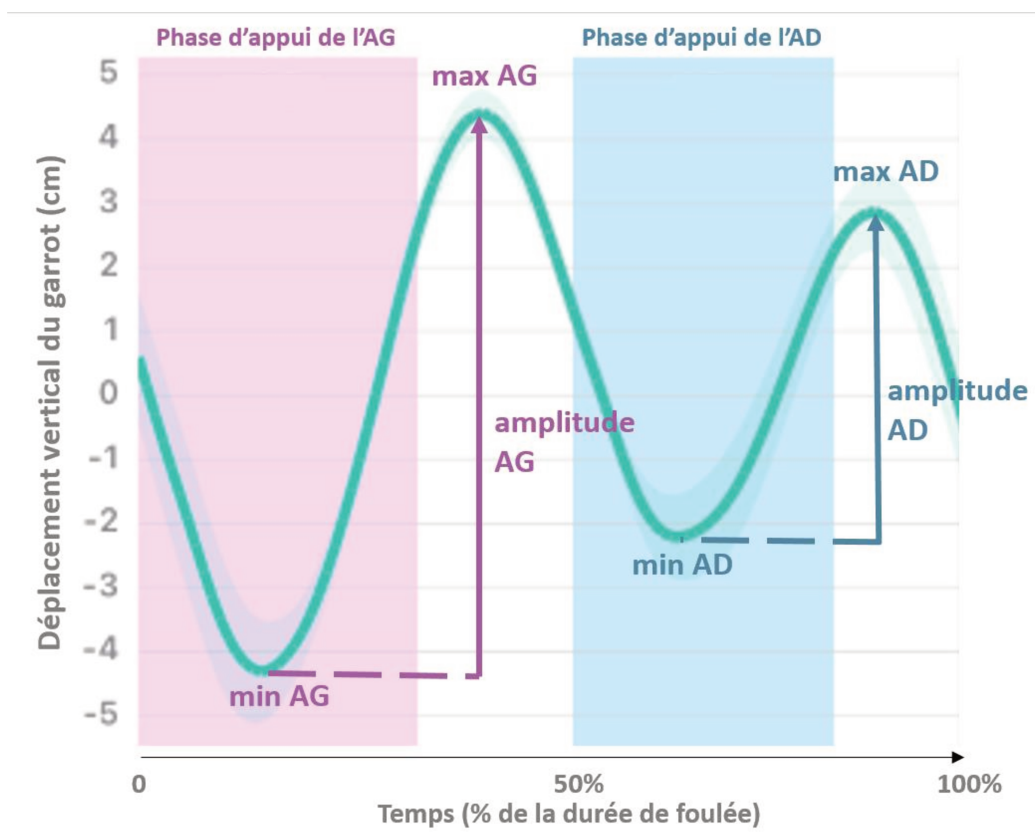


Figure 22 Courbe du déplacement dorso-ventral du garrot (en cm) au cours du temps (en % du temps de foulée) et les valeurs extraites de celle-ci afin de calculer les indices d'asymétrie AI-min, AI-max et AI-up. Les indications reportées en rose sont relatives à l'Antérieur Gauche (AG) et celles en bleue à l'Antérieur Droit (AD). Le cheval présentait une boiterie AD.

$$\text{AI-min (\%)} = \frac{\text{min AG} - \text{min AD}}{(\text{=Min}) \max(\text{amplitude AG}, \text{amplitude AD})}$$

$$\text{AI-max (\%)} = \frac{\text{max AG} - \text{max AD}}{(\text{=Max}) \max(\text{amplitude AG}, \text{amplitude AD})}$$

$$\text{AI-up (\%)} = \frac{\text{amplitude AG} - \text{amplitude AD}}{(\text{=Amplitude d'élévation}) \max(\text{amplitude AG}, \text{amplitude AD})}$$

Équation 1 Formules de calcul des indices d'asymétrie AI-min, AI-max et AI-up à partir des variables relatives au déplacement dorso-ventral de la tête ou du garrot au trot.

Il est important de préciser que seuls 3 indices sont présentés dans l'application parmi les indices étudiés au cours de ce travail. Les autres indices étudiés au cours des

articles sont décrits ci-dessous. La Figure 23 illustre les variables extraites de la courbe de déplacement dorso-ventral qui permettent les calculs de ces indices d'asymétrie complémentaires, eux-mêmes détaillés à l'Équation 2.

L'indice AI-down est la différence relative gauche-droite de l'amplitude dorso-ventrale parcourue lors de la chute et amortissement sur le pied. L'indice AI-Stance-Duration, la différence de la durée d'appui des pieds gauche-droite, rapportée sur la durée de la foulée. L'indice AI-Tmax, qui est la différence relative du temps écoulé entre les 2 maxima du déplacement dorso-ventral précédant et suivant l'appui sur chaque antérieur.

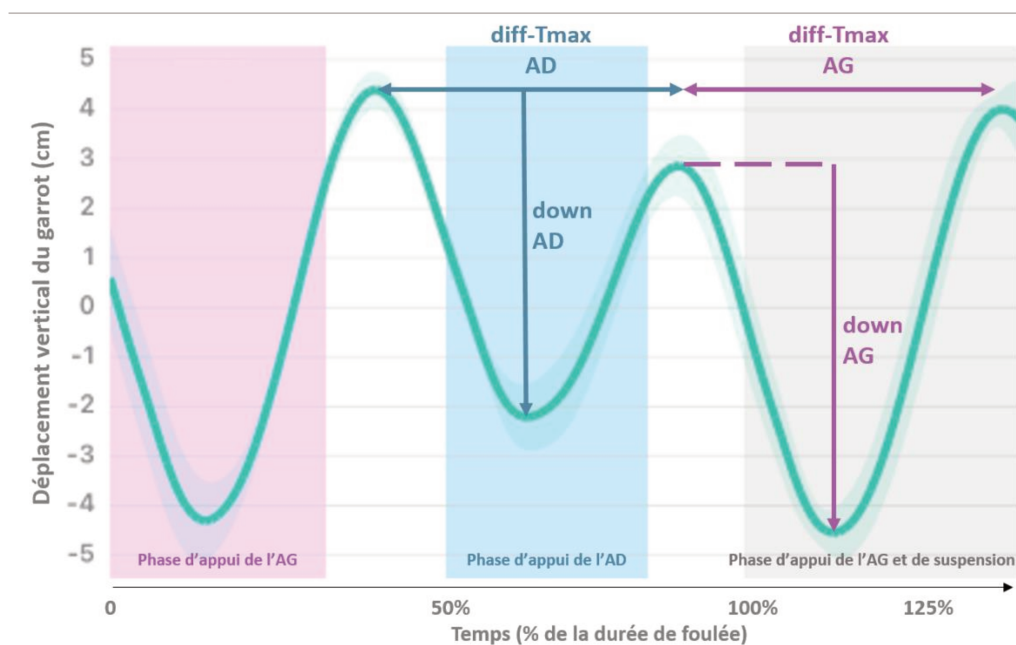


Figure 23 Courbe du déplacement dorso-ventral du garrot (en cm) au cours du temps (en % du temps de foulée) et les valeurs extraites de celle-ci afin de calculer les indices d'asymétrie AI-down, AI-Tmax et AI-stance_duration. Les indications reportées en rose sont relatives à l'Antérieur Gauche (AG) et celles en bleues à l'Antérieur Droit (AD). Le cheval présentait une boiterie AD.

$$AI\text{-down} (\%) = \frac{\text{down AG} - \text{down AD}}{\max(\text{down AG}, \text{down AD})}$$

$$AI\text{-Tmax} (\%) = \frac{\text{diff-Tmax AG} - \text{diff-Tmax AD}}{\max(\text{diff-Tmax AG}, \text{diff-Tmax AD})}$$

(=Durée entre 2 max)

$$AI\text{-stance_duration} (\%) = \frac{\text{durée d'appui AG} - \text{durée d'appui AD}}{\max(\text{durée d'appui AG}, \text{durée d'appui AD})}$$

(=Durée d'appui)

Équation 2 Formules de calcul des indices d'asymétrie AI-down, AI-Tmax et AI-stance_duration à partir des variables relatives au déplacement dorso-ventral de la tête ou du garrot au trot

En comparaison avec la littérature exposée au Chapitre 1.4.1, l'Amplitude dorso-ventrale est l'indice diffUp en valeur relative ; le « Min » est l'indice « diffMin » en valeur relative et le « Max » est l'indice « diffMax » en valeur relative. Dans les communications internationales, leur traduction anglaise est alors « Asymmetry Indice » (AI-up ; AI-min et AI-max).

En pratique, le vétérinaire positionne les capteurs sur le cheval avant l'examen locomoteur dynamique, lance l'enregistrement avec la tablette, puis réalise son examen habituel (Figure 24). Il filme avec la tablette le cheval qui effectue chaque condition (listées pour le CIRALE dans le Chapitre 1.2.1). À la fin, la tablette télécharge via Wifi les données enregistrées par les capteurs, puis les traite automatiquement. Les courbes de déplacement, la vidéo synchronisée et les indices d'asymétrie associés sont alors présentés par condition sur l'interface de l'application dédiée. Les analyses de la locomotion sur les différentes conditions, mais aussi celles lors d'examens locomoteurs antérieurs ou suite à une anesthésie diagnostique peuvent être comparées. La Figure 26 montre l'interface de visualisation pour un cas.



Figure 24 Le système EQUISYM® utilisé lors d'un examen locomoteur dynamique. Le vétérinaire a lancé l'enregistrement et filme la locomotion avec la tablette



Figure 25 Vue rapprochée des attaches pour fixer les capteurs du système EQUISYM® au postérieur gauche (a) et au garrot (b) du cheval

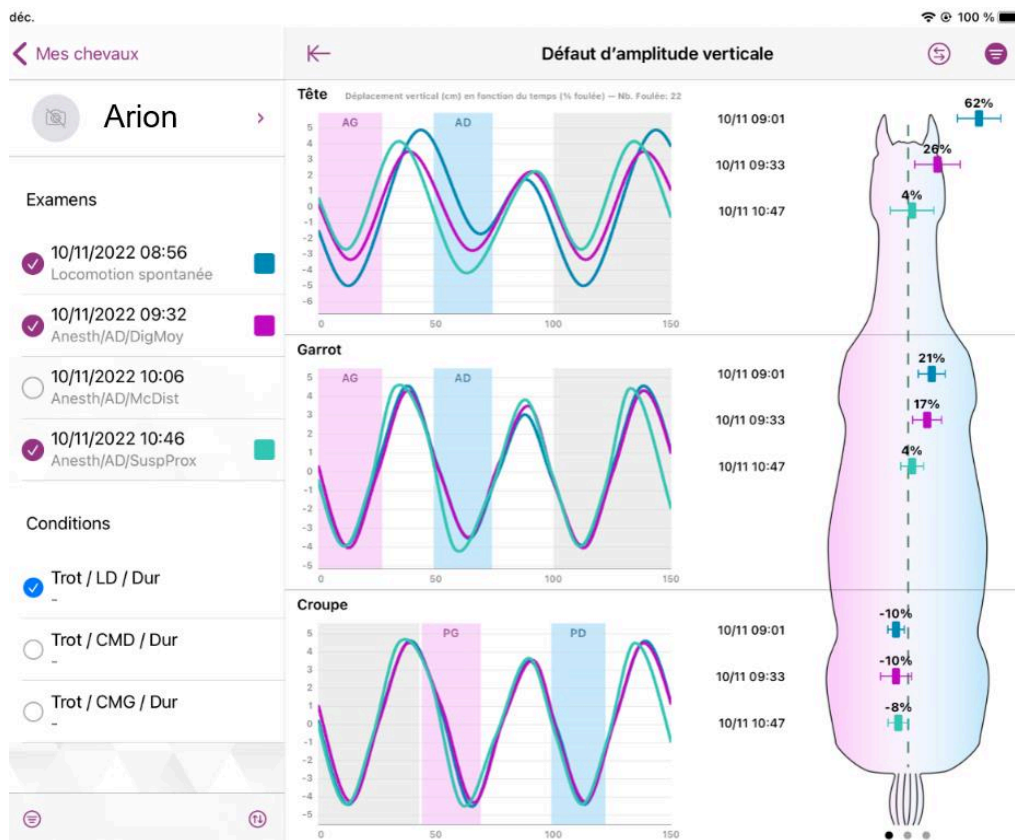


Figure 26 Interface de l'application EQUISYM®. Sur cette visualisation, la locomotion au trot en ligne droite sur sol dur d'Arion est comparée entre sa locomotion spontanée (bleue), après anesthésie digitale moyenne (rose) et après anesthésie proximale du suspenseur (vert) de l'antérieur droit. Les indices d'asymétrie de l'amplitude dorso-ventrale sont représentés sur le cheval à droite. L'asymétrie antérieure droite présente sur la tête et le garrot en locomotion spontanée est réduite au cours des anesthésies.

2.1.2 Les acteurs du développement

Les objectifs de la thèse s'inscrivent dans un projet de développement d'un outil de quantification des boiteries à destination des vétérinaires. Ce développement s'est réalisé avec une équipe de compétences pluridisciplinaires, regroupant des scientifiques, des vétérinaires et des ingénieurs. Aidée par mes co-encadrants, mon travail a consisté en l'automatisation du traitement des données avec le développement et l'optimisation de l'algorithme intégré dans l'application EQUISYM® ; la création de la base de données ; la conception des attaches ; la conception du fil de fer de l'application ; la conception de la data-visualisation des résultats ; la rédaction

du cahier des charges à destination des partenaires extérieurs ; et la communication entre les différents intervenants.

En amont de ce travail, Jeanne Parmentier a travaillé principalement sur la validation de la mesure du déplacement vertical à partir d'une OMC et sur l'effet de la vitesse sur l'asymétrie du cheval. La phase de validation scientifique a été précédée par une phase de développement algorithmique et matériel du système EQUISYM®. Elle a nécessité l'intégration du prototype dans le protocole de consultation du CIRALE et le recueil de nombreuses données dans des conditions cliniques. Au temps où le système était à l'étape de prototype avec une utilisation laborieuse, Emeline De Azevedo, Technicienne de recherche, a participé à la collecte des données, donnait les points d'amélioration techniques relevés sur le terrain, traitait les données pour fournir les résultats aux cliniciens et relevait les diagnostics cliniques de chaque cas. La cohérence des résultats était analysée au cas par cas afin d'améliorer l'algorithme. De nombreux échanges avec les cliniciens du CIRALE ont permis de remettre en question constamment le protocole, de corriger les méthodes scientifiques employées et de rediriger les objectifs d'étude.

L'amélioration des attaches des IMUs sur le cheval a nécessité de nombreux prototypes produits par l'équipe de bureau d'étude et les selliers de LIM Group. Testés en consultation, les retours des utilisateurs ont mis en avant les points d'amélioration. Ainsi le temps de mise en place, la stabilité des capteurs et l'adaptabilité aux variations morphologiques ont été affinés, et la gêne causée au cheval a été réduite.

Des partenaires extérieurs, comme OD&B pour la partie développement UX/UI design et Ob'dO pour la partie ingénierie électronique et applicative, ont participé au développement matériel du système EQUISYM®. L'intégration de l'algorithme dans la tablette, passant par une traduction en un autre langage de programmation (Swift), est réalisée pour chaque amélioration de l'algorithme par Camille Hébert, ingénieure LIM France en électronique embarquée.

Enfin, le système EQUISYM® a été mis en commercialisation par la société ARIONEO qui a intégré le groupe LIM en 2021. Les cliniciennes du CIRALE ont intégré le système automatisé dans leur pratique quotidienne. Cette utilisation au cours des consultations enrichit de jour en jour la base de données et donne des retours rapides sur les tests

d'évolution de l'outil. De plus, Marie Didier, responsable test produit, a mesuré plus de 300 examens locomoteurs de chevaux dans des centres équestres avec le prototype d'EQUISYM®. Dans le cadre de cette thèse, un travail pédagogique a été effectué pour la formation et le transfert de connaissance aux commerciaux, à la technico-commerciale Athina Miliotis, à l'équipe de support et de communication.

2.2 Objectifs scientifiques

L'objectif de cette thèse est de valider scientifiquement la répétabilité de la mesure d'asymétrie et la signification clinique d'indices d'asymétrie issus d'un outil de mesure inertielle pour l'aide au diagnostic de boiterie dans le cadre d'un examen locomoteur dynamique vétérinaire.

2.2.1 Objectif 1 : Répétabilité

Le premier objectif est de vérifier que le système mesure des indices répétables en conditions cliniques. Il est donc prérequis de poser les limites de la mesure en déterminant la répétabilité et la reproductibilité inter-opérateurs des mesures d'asymétrie pour la locomotion en ligne droite et en cercle. Il est supposé que des mesures répétées montrent une faible variation et l'opérateur n'induit pas de variation notable sur les mesures. Le Chapitre 0 aborde ce sujet avec un article qui est le fruit de l'encadrement de la thèse d'exercice vétérinaire de Iris Timmerman et qui a été publié dans la revue *Sensors* : Timmerman, I.; Macaire, C.; Hanne-Poujade, S.; Bertoni, L.; Martin, P.; Marin, F.; Chateau, H. A Pilot Study on the Inter-Operator Reproducibility of a Wireless Sensors-Based System for Quantifying Gait Asymmetries in Horses. *Sensors* 2022, 22, 9533, doi:10.3390/s22239533. Pour une validation complète de l'outil de mesure, la variation des mesures intra-individuelles est également à comparer à la variation des mesures interindividuelles. Dans ce but, les mesures sur un échantillon de référence, c'est-à-dire non pathologique, doivent être analysées.

2.2.2 Objectif 2 : Valeurs d'asymétrie chez les chevaux sains

Avant l'étude des valeurs pathologiques, la mesure de l'asymétrie chez des chevaux sains en ligne droite renseigne sur les valeurs physiologiques. Le second objectif est

donc de décrire les valeurs d'asymétrie mesurées chez des chevaux jugés sains par un vétérinaire en ligne droite. Dans cette étude, l'hypothèse suivante est émise : les chevaux sains en ligne droite présenteraient des valeurs d'asymétrie qui seraient centrées sur une symétrie théoriquement parfaite et qui montreraient une variabilité biologique. Le Chapitre 0 décrit l'asymétrie de chevaux sains. Les résultats de cette étude ont été publiés dans la revue *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering* et ont fait l'objet d'une présentation au 47^e congrès de la Société de Biomécanique en octobre 2022 : Macaire, C.; Hanne-Poujade, S.; De Azevedo, E.; Hatrisse, C.; Hebert, C.; Martin, P.; Marin, F.; Chateau, H. Movement asymmetry measured in sound horses trotting on a straight line. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 25:sup1, S194-S195, 2022. doi:10.1080/10255842.2022.2116885. hal-03887134.

2.2.3 Objectif 3 : Identification des seuils d'asymétrie pour détecter une boiterie au trot en ligne droite

Après avoir identifié les valeurs physiologiques, l'étape suivante consiste à les comparer aux valeurs pathologiques. Ainsi nous commençons par décrire les valeurs d'asymétrie mesurées chez des chevaux boitant visuellement d'un membre en ligne droite, en différenciant le membre atteint. Il est supposé que le mouvement dorso-ventral de la tête soit réduit lors de l'appui sur l'antérieur visuellement boiteux et que le mouvement dorso-ventral de la croupe soit réduit lors de l'appui sur le postérieur visuellement boiteux, par rapport à l'asymétrie mesurée chez les chevaux sains en ligne droite. Ces différences mettent en valeur l'impact des anomalies locomotrices visuellement identifiées sur chaque indice d'asymétrie.

Ces valeurs sont ensuite confrontées à celles de chevaux jugés sains en calculant la meilleure sensibilité et spécificité à les discriminer. Il est supposé que les indices d'asymétrie de la tête et du garrot discriminent les chevaux sains des chevaux présentant une boiterie antérieure, à la différence des indices d'asymétrie de la croupe qui discriminent les chevaux sains des chevaux présentant une boiterie postérieure. La sensibilité et la spécificité des indices d'asymétrie pour discriminer des chevaux boitant d'un membre et des chevaux sains permettent d'étudier ceux pour lesquels le pouvoir discriminant est le meilleur en spécificité comme en sensibilité.

Pour les indices les plus pertinents, les valeurs seuils de détection d'une boiterie et d'identification du membre boiteux sur la ligne droite sont ensuite déterminés. Ces seuils de détection de boiterie pour chaque membre sont une aide à l'interprétation clinique des valeurs fournies par l'outil dans le cadre de l'examen locomoteur.

Le Chapitre 0 étudie ces questions sous la forme d'un article publié dans la revue *Animals* : Macaire, C.; Hanne-Poujade, S.; De Azevedo, E.; Denoix, J.-M.; Coudry, V.; Jacquet, S.; Bertoni, L.; Tallaj, A.; Audigié, F.; Hatrisse, C.; Hébert, C.; Martin, P.; Frédéric Marin, F.; Chateau, H.. Investigation of Thresholds for Asymmetry Indices to Represent the Visual Assessment of Single Limb Lameness by Expert Veterinarians on Horses Trotting in a Straight Line. *Animals* 2022, 12, 3498, doi:10.3390/ani12243498.

2.2.4 Objectif 4 : Identification des seuils d'asymétrie pour détecter une boiterie au trot sur un cercle

Le déplacement en cercle est fondamental pour la détection des boiteries au cours de l'examen locomoteur. Or aucune valeur de référence n'a été identifiée pour l'interprétation clinique des paramètres d'asymétrie. Le travail réalisé sur la ligne droite est appliqué dans ce chapitre sur les cercles afin d'identifier les paramètres d'asymétrie les plus pertinents et de définir les seuils de détection de la boiterie de chaque antérieur sur les deux mains en cercle sur sol dur. Il est supposé que le cercle induit une asymétrie physiologique identifiable, mais variable sur les chevaux sains. Des seuils permettraient de discriminer l'asymétrie liée à la boiterie antérieure qui s'ajouterait à cette asymétrie physiologique induite par le cercle. Le Chapitre 0, qui étudie cette question, inclut un article actuellement soumis dans la revue *Animals* : Macaire, C.; Hanne-Poujade, S.; De Azevedo, E.; Denoix, J.-M.; Coudry, V.; Jacquet, S.; Bertoni, L.; Tallaj, A.; Audigié, F.; Hatrisse, C.; Hébert, C.; Martin, P.; Frédéric Marin, F.; Chateau, H. Asymmetry Thresholds Representing the Visual Assessment of Forelimb Lameness by Expert Veterinarians on Horses Trotting in circles.

2.3 Valorisations scientifiques

Ce travail a été le fruit de valorisations scientifiques, autant sous forme de présentations orales dans le cadre de congrès que de publications dans des revues scientifiques.

2.3.1 Publications scientifiques

- Timmerman, I.; Macaire, C.; Hanne-Poujade, S.; Bertoni, L.; Martin, P.; Marin, F.; Chateau, H. A Pilot Study on the Inter-Operator Reproducibility of a Wireless Sensors-Based System for Quantifying Gait Asymmetries in Horses. *Sensors* 2022, 22, 9533, doi:10.3390/s22239533.
- Macaire, C.; Hanne-Poujade, S.; De Azevedo, E.; Hatrisse, C.; Hebert, C.; Martin, P.; Marin, F.; Chateau, H. Movement asymmetry measured in sound horses trotting on a straight line. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 25:sup1, S194-S195, 2022. doi:10.1080/10255842.2022.2116885. hal-03887134
- Macaire, C.; Hanne-Poujade, S.; De Azevedo, E.; Denoix, J.-M.; Coudry, V.; Jacquet, S.; Bertoni, L.; Tallaj, A.; Audigié, F.; Hatrisse, C.; Hébert, C.; Martin, P.; Frédéric Marin, F.; Chateau, H.. Investigation of Thresholds for Asymmetry Indices to Represent the Visual Assessment of Single Limb Lameness by Expert Veterinarians on Horses Trotting in a Straight Line. *Animals* 2022, 12, 3498, doi:10.3390/ani12243498.
- Macaire, C.; Hanne-Poujade, S.; De Azevedo, E.; Denoix, J.-M.; Coudry, V.; Jacquet, S.; Bertoni, L.; Tallaj, A.; Audigié, F.; Hatrisse, C.; Hébert, C.; Martin, P.; Marin, F. & Chateau, H. Asymmetry Thresholds Reflecting the Visual Assessment of Forelimb Lameness on Circles on a Hard Surface. *Animals* 2023, 13(21), 3319. <https://doi.org/10.3390/ani13213319>

2.3.2 Participations à des congrès

- Journées annuelles de l'AVEF – novembre 2021 : présentation orale et poster intitulés « Sensibilité et spécificité d'un dispositif de quantification des boiteries chez le cheval (EQUISYM®) »

- 11e International Conference on Equine Exercise Physiology (ICEEP) – juin 2022 : présentation orale et poster intitulés « Exploration of asymmetry thresholds to characterise hindlimb lameness on the circle »
- 47e Congrès de la Société de biomécanique – octobre 2022 : présentation orale intitulée « Mesure de l'asymétrie du mouvement au trot en ligne droite chez des chevaux sains »
- Journées annuelles de l'AVEF – novembre 2022 : présentation orale intitulée « Mesure de l'asymétrie physiologique chez des chevaux sains au trot sur le cercle »
- Atelier AVEF Défauts de locomotion du cheval monté – mars 2023 : présentation orale avec P. Martin intitulée « développement technique et validation scientifique d'un système de quantification de l'asymétrie du cheval »
- Journées de la recherche EnvA – septembre 2023 : présentation orale intitulée « Sensibilité et spécificité d'un dispositif de quantification des boiteries chez le cheval »

2.3.3 Travaux annexes à la thèse

Encadrement de Thèses d'exercice vétérinaire

- Thèse intitulée « Utilisation d'un système de quantification des boiteries (EQUISYMND) pour évaluer l'effet des anesthésies diagnostiques chez le cheval » soutenue à l'EnvA le 8 octobre 2021 par Raphaëlle Pichard
- Thèse intitulée « Etude de la qualité métrologique (reproductibilité inter-opérateurs) d'un système de quantification des asymétries locomotrices chez le cheval (EQUISYM[®]) » soutenue à l'EnvA le 18 octobre 202 par Iris Timmerman
- Thèse sur l'application de l'analyse multivariée pour la détection des boiteries chez le cheval à partir d'un ensemble d'indices d'asymétrie en cours de réalisation par Emma Poizat
- Thèse sur la discrimination d'un test de flexion positif et d'un test de flexion négatif à partir de l'évolution de l'asymétrie du cheval en cours de réalisation par Jonathan Chevant

Encadrement de Stages

- Clara Moriseau, dans le cadre de son Master 1 en Biologie intégrative & physiologie Parcours Management de l'expérimentation, a réalisé un stage d'une durée de 2 mois au sein du CIRALE de mai à juin 2022 sur le sujet suivant : Comparaison de l'évolution de l'asymétrie entre avant et après anesthésie diagnostique selon l'appréciation visuelle de son effet sur la locomotion du cheval
- Noa Soffer, au cours de son année Bac +4 de la formation d'ingénieur en Génie Biologique, a réalisé un stage au sein de l'entreprise LIM France de Septembre 2022 à février 2023 sur le sujet suivant : Suivi longitudinal de la locomotion chez le cheval athlète



CHAPITRE 3

A Pilot Study on the Inter-Operator Reproducibility of a Wireless Sensors-Based System for Quantifying Gait Asymmetries in Horses

Timmerman, I.; **Macaire**, C.; Hanne-Poujade, S.; Bertoni, L.; Martin, P.; Marin, F.;
Chateau, H. A Pilot Study on the Inter-Operator Reproducibility of a Wireless
Sensors-Based System for Quantifying Gait Asymmetries in Horses. *Sensors* 2022,
22, 9533, doi:10.3390/s22239533

Tout instrument de mesure procure une incertitude de mesure. La validation du système EQUISYM® est donc d'abord technique. L'objectif de ce chapitre est d'évaluer la répétabilité et la reproductibilité inter-opérateurs afin de connaître les limites de l'utilisation du système. Cette évaluation est réalisée en reproduisant les conditions potentiellement rencontrées sur le terrain. En effet les utilisateurs d'EQUISYM® seront variés. Par exemple, des cavaliers n'ayant jamais vu le système seront amenés à mettre en place le système dans le cadre d'un suivi locomoteur de leur cheval.

De façon à limiter les répétitions, la partie « Materials and methods » de l'article scientifique correspondant à ce chapitre a été écourtée sur la description d'EQUISYM® et sur les calculs des indices d'asymétrie, qui ont été détaillés au Chapitre 2.1.1. L'intégralité de cet article est disponible en *Annexe 1*.

Des résultats additionnels sont par ailleurs présentés dans ce chapitre.

3.1 Introduction

Locomotor diseases associated with lameness is one of the most frequent disorder affecting horses. Hence, they represent the biggest part of working time and incomes of the equine veterinarians (Loomans, 2008; Nielsen et al., 2014). Even for the most experienced of them, the lameness evaluation remains subjective and the diagnosis complicated (Fuller et al., 2006; Hammarberg et al., 2016; Mitchell, 2012). Subjectivity increases when the lameness is slight (Keegan et al., 2010), and some bias in the evaluation make the repeatability of the visual examination questionable, like expectation of improvement after nerve block (Arkell et al., 2006).

The will to move towards a more objective evaluation allowed the rise of several tools for gait analysis. Stationary force plate and Motion Capture are the most precise and accurate methods, but they cannot be used in current practice, in the field (Serra Bragança et al., 2018). The needs of veterinary practitioners are about a portable, trustworthy, fast and easy tool to use on the field. Inertial Measurement Units (IMUs) appear then as the most suitable alternative (McCracken et al., 2012).

For instance, EQUISYM® is a tool designed to assist veterinarians in the daily clinical diagnosis of locomotor disorders in horses. It provides quantified locomotion data and

guide the diagnosis of lameness with objective indicators based on the calculation of asymmetries between left and right limbs during locomotion at the trot. In this context, the system can be used by different veterinarians at different times. In order to be able to compare results with each other, to ensure long-term locomotor monitoring or to carry out multi-centre studies, it is necessary to verify that the system is capable of giving an equivalent measurement regardless of the operator using it, including novices.

For this purpose, repeatability and reproducibility of the system, among other factors, must be assessed. Repeatability condition of measurement is defined as “condition of measurement, out of a set of conditions that includes the same measurement procedure, same operators, same measuring system, same operating conditions and same location, and replicate measurements on the same or similar objects over a short period of time” and reproducibility condition of measurement as “condition of measurement, out of a set of conditions that includes different locations, operators, measuring systems, and replicate measurements on the same or similar objects” (« International Vocabulary of Metrology—Basic and General Concepts and Associated Terms », 2008).

IMUs-based systems for quantifying lameness in horses have been assessed by showing the correlation or the concordance with Motion Capture systems used as a gold standard (Bosch et al., 2018; Keegan et al., 2004; Martin et al., 2014; Pfau et al., 2005; Sapone et al., 2020). However few studies aimed to assay the repeatability of the measurements. For instance, Keegan and al. studied an IMUs-based system repeatability in an uncontrolled environment on 236 horses (Keegan et al., 2011). After instrumentation of each horse, they were trotted twice at five minutes' intervals in straight line, in various places and surface conditions. Another study aimed to determine repeatability of gait variables such as the symmetry of several segments (metacarpal and metatarsal region, hind limb asymmetry...) and joint range of motion in the sagittal and coronal planes, during trotting under a controlled treadmill exercise (Cruz et al., 2017). In this study, ten non-lame horses were instrumented and then trotted three times a day, three days a week, over a three-week period. The repeatability was considered as high for most of the variables. A third study evaluated the influence of biological variations among time by trotting fourteen Thoroughbred

horses in a straight line once a day for five consecutive days, and then once a week for five consecutive weeks while horses were in race training (Sepulveda Caviedes et al., 2018). Daily and weekly repeatability was lower than the previous study (Cruz et al., 2017). Mainly, horses were of varying training and movement asymmetry levels and it was not possible to dissociate the effects of the sensors placement from the biological variability. None of these studies have evaluated the inter-operator reproducibility. To the best of our knowledge, it has not been studied yet.

In this context, the goal of our study was to focus on the effect of IMUs placement by different operators in order to assess reproducibility and to verify that the system can be used reliably regardless of the user's level of expertise, under all the conditions of the locomotor examination (straight line and circles).

The objective of our study was then to evaluate the repeatability and the inter-operator reproducibility of a gait analysis system, EQUISYM®, in a standardised environment, on a straight line and on circles, with different users. It was hypothesized that the variance attributed to the operator is negligible compared to the total variance.

3.2 Materials and Methods

3.2.1 Horses

Three trotters from the « Centre d'Imagerie et de Recherche sur les Affections Locomotrices Equines » (CIRALE) were included: a 13 years old gelding, a 14 years old mare and a 27 years old gelding. These three horses were not on any training beyond the experiment and no subjective gait change was noticed over the three days of experiment.

3.2.2 Instrumentation

Horses were equipped with EQUISYM®. They recorded during a minimum of 20 trot strides on straight line and on circles.

3.2.3 Protocol

Facilities were composed of a straight line of 30 meters and a circle of 14 meters in diameter. Four different operators were selected: two of them had never placed the

sensors before, whereas the other two operators were used to do it. A demonstration has been made for the operators who had never placed it before the experiment. Each operator placed the sensors four times on each horse along three consecutive days, which led to a total of 48 repetitions randomly assigned. To avoid the habituation effect, each operator waited at least one hour between two consecutive positioning. When the measurement system was placed, the horse was trotted in-hand on a hard surface, firstly in a left rein circle, then in a right rein circle and finally in a straight line. The protocol was intended to mimic the standardised conditions of a locomotor examination. The mean \pm standard deviation (SD) of the recorded strides was distributed as following: 29.5 \pm 5.5 strides on straight line, 32.1 \pm 9.5 on right rein circle, 36.5 \pm 9.4 on left rein circle.

The handler was the same person during the three days of experiment. Each horse performed maximum three successive repetitions in order to limit fatigue influence. Between two sessions of three repetitions, each horse had an hour break minimum.

3.2.4 Data processing

Data were analysed using custom-written Matlab2020a (The MathWorks, Natick, MA, USA) scripts.

From the vertical displacement of the head (-H), withers (-W) and pelvis (-P) occurring along a stride, 4 variables were calculated for each sensor location. The following Asymmetry Indexes (AI), expressed as percentage of the maximal range of motion within a stride, were used to compare left vs right part of the stride : AI-Min was the left-right difference of the lowest altitude point; AI-Max was the left-right difference of the highest altitude point, AI-up was the left-right difference of the upward range of motion during the propulsion phase, AI-down was the left-right difference of the downward range of motion during the damping phase, and AI-stance-duration was the left-right difference of the duration of the stance phase.

3.2.5 Statistical analysis

To evaluate the repeatability and the inter-operator reproducibility, for each AI presented above and each condition (i.e. straight line, left and right rein circle), the total variance, as well as the corresponding SD, and the variance attributable to the operator

were calculated. To do this, a model of analysis of variance was computed with operators and horses as random effects (Shrout & Fleiss, 1979). As the rank of repetition and the experience of the operator could also be a source of variation, the model was adjusted on these two factors as fixed effects. The statistical analysis was performed with the RStudio software 4.0.3 (RStudio Inc., Boston, MA, USA).

3.2.6 Results

Straight line results are exposed in Tableau 2.

Tableau 2 Total variance, total standard deviation and percentage of variance due to the operators (calculated out of the total variance) for four asymmetry indexes (AI -Up, -Down, -Max and -Min) calculated on the head (H), the withers (W) and the pelvis (P) for 48

AI	Total variance	Total standard deviation	Percentage of variance due to the operators (%)
AI-Up-H (%)	723.3	26.9	0.0
AI-Down-H (%)	683.0	26.1	0.0
AI-Max-H (%)	346.1	18.6	0.5
AI-Min-H (%)	506.3	22.5	0.0
AI-Up-W (%)	35.6	6.0	0.7
AI-Down-W (%)	119.0	10.9	0.0
AI-Max-W (%)	53.8	7.3	1.1
AI-Min-W (%)	39.9	6.3	0.0
AI-Stance-Duration-FRONT (%)	57.4	7.6	2.1
AI-Up-P (%)	97.4	9.9	0.6
AI-Down-P (%)	202.4	14.2	0.0
AI-Max-P (%)	89.2	9.4	0.4
AI-Min-P (%)	90.0	9.5	0.1
AI-Stance-Duration-HIND (%)	11.1	3.3	0.0

In a straight line, the total variance was the highest for the index AI-Up-H (723.3) and the lowest for AI-Stance-Duration-HIND (11.1). Total variance and SD were higher for head-related AIs than for the withers or pelvis. The SD ranged between 18.6% and 26.9% for head-related AIs, and between 3.3% and 14.2% for pelvis and withers-related AIs. For all indexes, the percentage of variance attributable to the operator was close to zero, with a maximum value of 2.1% for AI-Stance-Duration-FRONT.

Left rein circle results and right rein circle results are presented in Tableau 3. In both left and right rein circles, total variance was maximum for AI-Up-H (respectively 1448.2 and 2089.4), and minimum for AI-Stance-Duration-FRONT (respectively 18.1 and 36.7). As in a straight line, the total variance and SD were higher for head-related AIs.

The SD varied in a similar range of values, respectively between 15.0% and 38.1% in left rein circle and between 13.5% and 45.7% in right rein circle for head-related AIs, and between 4.2% and 26.2% in left rein circle and between 6.3% and 31.3% in right rein circle for pelvis and withers-related AIs. AI-Down was systematically associated with a larger variance than the other AIs calculated for the withers and the pelvis.

Tableau 3 Total variance, total standard deviation and percentage of variance due to the operators (calculated out of the total) for four asymmetry indexes (AI-Up, -Down, -Max and -Min) calculated on the head (H), the withers (W) and the pelvis (P) for 48 repeated

AI	Left rein circle			Right rein circle		
	Total variance	Total standard deviation	Percentage of variance due to the operators (%)	Total variance	Total standard deviation	Percentage of variance due to the operators (%)
AI-Up-H (%)	1448.2	38.1	0.5	2089.4	45.7	4.2
AI-Down-H (%)	521.0	22.8	0.0	963.1	31.0	0.0
AI-Max-H (%)	224.2	15.0	0.5	182.6	13.5	5.3
AI-Min-H (%)	765.0	27.7	0.0	1314.9	36.3	2.8
AI-Up-W (%)	111.2	10.5	3.6	403.6	20.1	0.0
AI-Down-W (%)	179.6	13.4	0.0	513.7	22.7	1.2
AI-Max-W (%)	102.2	10.1	1.0	97.9	9.9	0.0
AI-Min-W (%)	69.0	8.3	0.0	548.8	23.4	0.0
AI-Stance-Duration-FRONT (%)	18.1	4.2	1.0	115.5	10.7	0.0
AI-Up-P (%)	254.4	15.9	0.0	981.6	31.3	0.0
AI-Down-P (%)	687.7	26.2	0.0	124.5	11.2	0.0
AI-Max-P (%)	174.7	13.2	0.0	226.5	15.0	0.0
AI-Min-P (%)	397.9	19.9	0.0	334.7	18.3	0.4
AI-Stance-Duration-HIND (%)	18.4	4.3	4.6	36.7	6.1	0.0

Similar to the straight line, the variance attributable to the operator in circle was close to zero for most of the AIs and reached a maximum of 4.6% of the total variance for AI-Stance-Duration-HIND in left rein circle, and a maximum of 5.3% of the total variance for AI-Max-H in right rein circle.

Removing the variation attributable to the operator and to the subjects (inter-individual), the SD are presented in the Table 4. SD values were ranged between 8.6% and 24.5% for head-related AIs, and between 4% and 7.9% for pelvis and withers-related AIs on the straight line. On the circle, the SD showed higher values for pelvis and withers-related AIs, ranged between 5.7% and 12.8%.

Table 4 Residual standard deviation removing the variation part due to the operators and the subjects, for four asymmetry indexes (AI-Up, -Down, -Max and -Min) calculated on the head (H), the withers (W) and the pelvis (P) for 48 repeated measurements (4 operator

AI	Residual standard deviation on the straight line	Residual standard deviation on the left rein circle	Residual standard deviation on the right rein circle
AI-Up-H (%)	24.5	22	21
AI-Down-H (%)	17.4	20.3	20.3
AI-Max-H (%)	8.6	9.3	9
AI-Min-H (%)	21.1	16	19
AI-Up-W (%)	4.3	6.4	13.1
AI-Down-W (%)	5.7	9.7	9.6
AI-Max-W (%)	3.2	5.7	7.5
AI-Min-W (%)	4.3	7.5	10.5
AI-Stance-Duration-FRONT (%)	5.4	3.8	6.4
AI-Up-P (%)	7.9	12.3	12.8
AI-Down-P (%)	5.2	8.2	8.6
AI-Max-P (%)	4	5.8	6
AI-Min-P (%)	5.5	9.5	9.7
AI-Stance-Duration-HIND (%)	2	3.5	3.8

3.3 Discussion

The purpose of this study was to evaluate repeatability and reproducibility between operators of an IMU-based gait analysis system used to quantify asymmetry indexes in horses trotting in straight line and circles under the same circumstances than a standard locomotor clinical exam. In our study, the variance attributable to the operator was very low, which tends to validate our starting hypothesis: the asymmetry indexes are repeatable when one or several operators set up the sensors several times, when the horse trots on a hard surface, in a straight line or in a circle.

In this study, the variance attributable to the operators was slightly higher on a right rein circle, for head-related indexes (up to 5.3% of total variance). No obvious explanation can be attributed to this observation except than the effect of small misplacement of the sensors by the operator may be slightly higher on the circle than on the straight line.

As slight biological variations may be clinically relevant and many operators may be required to use the system, including those with little training, assessing reproducibility is essential to enable comparison of results obtained at different times, by different operators. Our results show that on the 42 asymmetry indexes measured (14 in straight

line, 14 in left hand circle and 14 in right hand circle), the variance attributable to the operator counted for less than 1% of the total variance in 81% of cases. For each exercise, the head-related indexes showed the highest SD (between 13.5% and 45.7%). On the contrary, the withers related variables showed the lowest SD (between 4.2% and 23.4%). The index AI_Down was associated with a larger variance than the other AIs for the withers and for the pelvis, indicating a higher variability of this index and thus a more complex interpretation.

Observed values for SD in straight line were close to the values calculated from a group of 49 sound horses with the same system (Macaire, Hanne-Poujade, De Azevedo, et al., 2022). SD values in a left and right rein circles were slightly higher. It has been shown that moving in circles induces a movement asymmetry which depends on speed and circle radius (Pfau et al., 2012). In our experiment none of these factors were strictly controlled, knowing that we wanted to remain in the same conditions as the standard clinical examination. This could explain the increased SD in circle, with a higher level of freedom, enabling the horse to change his body direction and speed (A. M. Hardeman et al., 2019; Pfau et al., 2012). It is also known that asymmetry on a circle is physiologically higher than in a straight line.

Total variance was higher for head related indexes than for the withers and pelvis, in a straight line and circles. Similar results have been found in previous experiments, in which head variability was higher than pelvis and withers variability (A. M. Hardeman et al., 2019; Sepulveda Caviedes et al., 2018). This is probably due to a wider degree of freedom for the head, resulting in multiple head movements caused by external stimuli such as other horses passing by, or noises. These uncontrolled head movements during some of our experiments are likely to explain the increase in total variance for indexes related to the head. This result supports the use of a sensor on the withers, which presents a much lower variability when exploring forelimb lameness. After adjustment of our statistical model on the level of expertise of the operator and on the rank of repetition, nothing indicates that one of them had a significant effect. Hence, no confounding could have been made between the level of expertise of the operator and the variability induced by the operators.

The area of the experiment was fixed in our study, and our hypotheses were tested only on a hard surface. A similar study should be done on a soft surface to extrapolate our findings. The reproducibility should also be studied in different places. Furthermore, asymmetry of the included horses has been considered steady during the three days of the experiment but it is obvious that the total variance measured depends not only on the measurement system but also on the inevitable biological variation of the locomotor asymmetry, whether physiological or pathological.

To date, no study had been conducted to measure the inter-operator reproducibility of IMU's to evaluate gait asymmetry in horses. Our study provides initial evidence that this type of system can be used by different operators, including novices, without major disruption to the measurement collection. The sample size (number of horses and operators) remains a limitation of this study. Ideally, future studies should be conducted to verify that inter-operator reproducibility remains valid in larger groups and on horses with different degrees of locomotor asymmetry.

3.4 Points à retenir

Ce chapitre a montré qu'EQUISYM® peut être utilisé par différentes personnes sans qu'elles aient d'impact notable sur les mesures, puisque la part de variabilité qui est attribuée à l'opérateur est proche de zéro pourcent. Ce résultat a été obtenu pour tous les indices d'asymétrie présentés dans l'outil et sur l'asymétrie des durées d'appui, pour la locomotion en cercles et en ligne droite. Le niveau d'expérience des opérateurs et l'ordre des répétitions ont aussi des effets anecdotiques sur les mesures. L'opérateur peut donc être un expert ou un novice, il n'aura que peu d'impact sur les mesures, sous réserve qu'il suive les consignes de mise en place.

De plus, en retirant la part liée à l'opérateur et à la locomotion propre des sujets, la variabilité résiduelle est proche de celle intra-individuelle. Pour une locomotion d'un même individu en cercle, les indices d'asymétries mesurés sur la tête présentent un écart-type allant jusqu'à 22% d'asymétrie ; sur le garrot jusqu'à 13,1% ; et sur la croupe jusqu'à 12,8%. La variation est plus faible en ligne droite pour le garrot et la croupe avec des écart-types allant jusqu'à respectivement 5,7% et 7,9% d'asymétrie. La variation intra-individuelle des mesures plus importante sur la tête était attendue

compte tenu des artéfacts des mouvements parasites qui peuvent se produire sur cette région très mobile.

La répétition des mesures sur quelques chevaux a permis de préciser les limites d'utilisation du système EQUISYM®. La reproductibilité avec différents opérateurs quel que soit leur niveau d'expérience a montré qu'il n'induisait pas de variation notable sur la mesure. Pour une validation complète de l'outil de mesure, la variation des mesures intra-individuelles est à comparer à la variation des mesures interindividuelles. Cette étape vérifie que les limites de mesures de l'outil correspondent à la précision des mesures recherchée. Définir la référence de mesure à partir d'un échantillon de chevaux sains est donc la prochaine étape de la validation de l'outil de mesure.



CHAPITRE 4

Movement asymmetry measured in sound horses trotting on a straight line

Macaire, C.; Hanne-Poujade, S.; De Azevedo, E.; Hatrisse, C.; Hebert, C.; Martin, P.; Marin, F.; Chateau, H. Movement asymmetry measured in sound horses trotting on a straight line. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 25:sup1, S194-S195, 2022. doi:10.1080/10255842.2022.2116885. hal-03887134

Dans ce chapitre sera décrite l'asymétrie mesurée par EQUISYM® dans un échantillon de chevaux trotant en ligne droite et jugés visuellement sains par un vétérinaire. En effet, avant d'étudier les anomalies pathologiques, la description de la norme physiologique est un prérequis. Les chevaux inclus dans cette étude constituent une partie des chevaux inclus dans l'étude du Chapitre 0, les 2 études s'inscrivant dans le même protocole expérimental. La Figure 27 est l'organigramme des chevaux sélectionnés dans le Chapitre 5, montrant que les chevaux étudiés ici ont été sélectionnés parmi une large population. Comme expliqué au Chapitre 1.4.2, de nombreux articles décrivent déjà l'asymétrie mesurée dans différentes populations de chevaux sains. Ce chapitre vient compléter ces données dans notre population de référence.

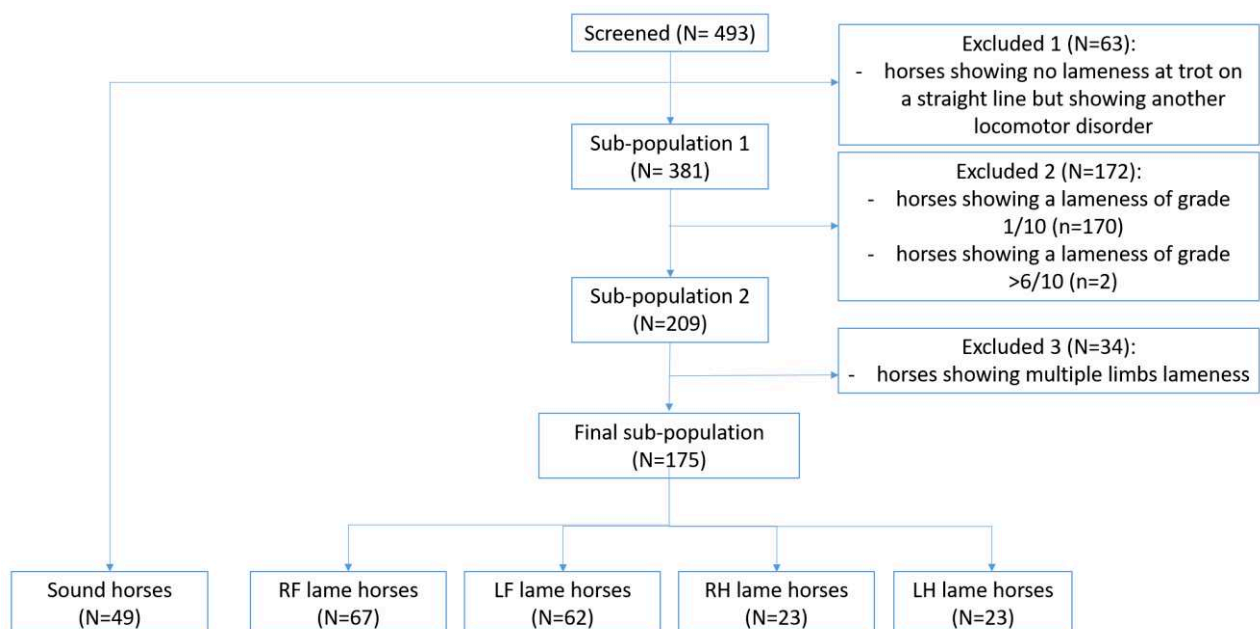


Figure 27 Organigramme de sélection des chevaux inclus dans les études constituant les chapitres 4 (uniquement les chevaux sains) et 5 (les chevaux sains et boiteux).

La partie « Methods » du résumé publié dans Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering a été volontairement écourtée sur la description d'EQUISYM® et sur les calculs des indices d'asymétrie, afin d'éviter les répétitions. L'intégralité de ce résumé est fourni en Annexe 2.

4.1 Introduction

During clinical examination, the veterinarian assesses the horse locomotion at trot in order to detect lameness. Visual observation is used to determine the painful limb and the lameness grade. However this assessment remains subjective with large variation between veterinarians, particularly for subtle lameness (Keegan et al., 2010). To assist in the diagnostic, movement analysis systems have been used increasingly in the veterinary practice. Particularly Inertial Measurement Units (IMU) allow versatile and pervasive protocols, their limit of agreement compared with the Motion Capture is of 9–16 mm (Warner et al., 2010). Vertical movement of the dorsal line (head, withers and pelvis), which decreases during the stance phase of the painful limb, is often used as biomarker. However, even sound horses able to perform at their maximal capacity demonstrated physiological asymmetrical gait (Kallerud et al., 2021). The definition of lame horse is then controversial (Weeren et al., 2017). Some studies measured asymmetry in a population of sound horses but the number of subjects was relatively small (Hardeman et al., 2019). The aim of this study was to define the range of asymmetry values which characterizes a population of sound horses.

4.2 Methods

4.2.1 Horses

49 horses of various breeds (21 Selle-Français, 6 Koninklijk Warmbloed Paardenstamboek Nederland, 4 Zangersheide and 18 other breeds), with an average age of 7.8 (range 2–15) years, were included in the study. These horses were considered by their owner/rider able to perform at their maximal capacity. Their locomotion has been evaluated as asymptomatic by an expert clinician (specialist in equine locomotor pathology) during a complete and standardized clinical locomotor examination (straight lines and circles, on hard and soft grounds at different gaits).

4.2.2 Data collection

Each horse was equipped with EQUISYM®. Recordings were performed during the locomotor examination when the horse trotted on a straight line on an asphalt surface, held in hand. A mean (min-max) of 14.3 (6–55) trot strides were recorded per horse.

4.2.3 Data processing

Four Asymmetry Indexes (AI) were calculated and expressed as a percentage of the maximal range of motion (%). AI-Min was the left-right difference of the lowest altitude point; AI-Max was the left-right difference of the highest altitude point; AI-up was the left-right difference of the upward range of motion during the propulsion phase; and AI-down was the left-right difference of the downward range of motion during the damping phase. Mean and median values, standard deviation (SD), 5th (5th P) and 95th (95th P) percentiles were calculated for the 49 sound horses included in this study.

4.3 Results and discussion

AI of the head showed a higher variability than AI of the withers and pelvis. This result should be analysed in conjunction with greater mobility of the head, which is also affected by parasitic movements inducing artefacts. Moreover head AI means were all slightly negative, which reflected a subtle decreased range of motion of the head during the Left Forelimb (LF) stance phase than during the Right Forelimb (RF) stance phase. In conventional horse training, the leader holds the rope connected to the horse's head, standing systematically to the left side of the horse. This asymmetrical posture of the handler may explain the slight movement reduction of the head during the left stance in sound horses (Table 5, Figure 28).

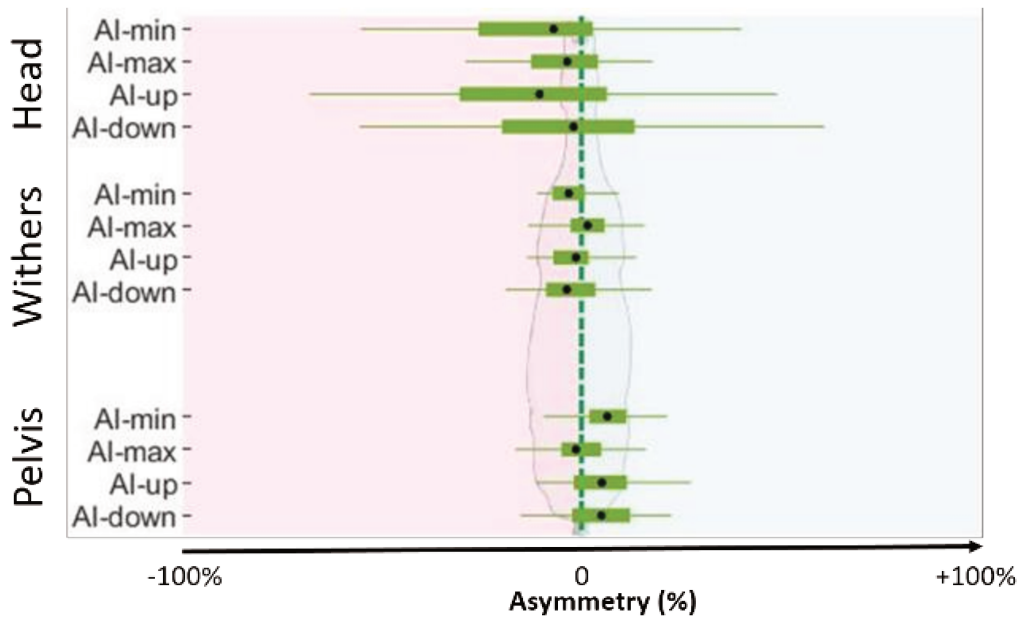


Figure 28 Boxplots (lines are from the minimal to the maximal value and the box are from the 25th to the 75th percentiles) of the asymmetry values (%) measured in 49 sound horses. Dots represent the means. Positive values represent a reduction of the right-side movement and negative values represents a reduction of the left movement

Table 5 Mean, SD, median, 5th and 95th percentiles of asymmetry indexes for 49 sound horses

		Mean (%)	SD (%)	Median (%)	5 th P (%)	95 th P (%)
Head	AI-min	-7	29	-12	-42	46
	AI-max	-4	12	-5	-23	15
	AI-up	-11	29	-11	-52	36
	AI-down	-2	29	-5	-48	52
Withers	AI-min	-3	8	-4	-11	8
	AI-max	2	8	1	-9	15
	AI-up	-1	9	-3	-12	16
	AI-down	-3	11	-2	-24	12
Pelvis	AI-min	6	8	6	-7	20
	AI-max	-1	9	-2	-19	11
	AI-up	5	13	5	-11	25
	AI-down	5	11	5	-14	20

AI of the withers showed relatively small variability between horses and were close to zero %, meaning that the physiological asymmetry of sound horses on the withers was small. Finally, AI of the pelvis also showed small variability between horses. AI-up, -

down and -min were slightly positive, which reflected a weaker downward movement during the right hindlimb stance phase than during the left hindlimb stance phase.

4.4 Conclusions

Sound horses showed slight asymmetries of the vertical movement of the head and pelvis (AI-min means of -7% and 6%), reflecting less movement amplitude during the left forelimb - right hindlimb stance phase. The variability was greater on the head (SD of 29% for AI-min, AI-up and AI-down) than on the withers and pelvis (maximal SD of 13%). It emphasizes the interest of biomarkers related to the trunk rather than to the head which is more affected by artefactual movements. Further studies are now needed to define asymmetry thresholds for discrimination between sound and pathological horses.

4.5 Points à retenir

Ainsi les valeurs présentées dans le Table 5 montrent une variation interindividuelle plus prononcée sur la tête (écart-type jusque 29%) que sur le garrot (écart-type jusque 11%) et la croupe (écart-type jusque 13%). Les moyennes et médianes des valeurs au garrot sont centrées sur une symétrie presque parfaite (valeurs entre -4% et +2%). Celles de la tête montrent en revanche une légère réduction des mouvements dorso-ventraux lors de l'appui sur l'antérieur gauche (valeurs entre -12% et -2%). De même, la croupe présente une légère réduction des mouvements lors de l'appui sur le postérieur droit (valeurs entre +5 et +6%, excepté AI-max).

La description de la population saine précise la variabilité interindividuelle physiologique. Les variations interindividuelles se révèlent supérieures aux variations intra-individuelles du précédent chapitre (Chapitre 3.2.6), 29% > 22% pour la tête, 11% > 6% pour le garrot et 13% > 8% pour la croupe. Ainsi la quantification des variations pour un même individu et entre différents individus a posé les limites de mesure de l'outil. Afin de valider cliniquement si l'asymétrie peut être un indicateur de la boiterie sur un membre donné, il convient maintenant de comparer les mesures sur des chevaux sains à celles enregistrées sur des chevaux présentant une boiterie d'un membre.



CHAPITRE 5

Investigation of Thresholds for Asymmetry Indices to Represent the Visual Assessment of Single Limb Lameness by Expert Veterinarians on Horses Trotting in a Straight Line

Macaire, C.; Hanne-Poujade, S.; De Azevedo, E.; Denoix, J.-M.; Coudry, V.; Jacquet, S.; Bertoni, L.; Tallaj, A.; Audigié, F.; Hattrisse, C.; Hébert, C.; Martin, P.; Frédéric Marin, F.; Chateau, H. Investigation of Thresholds for Asymmetry Indices to Represent the Visual Assessment of Single Limb Lameness by Expert Veterinarians on Horses Trotting in a Straight Line. *Animals* 2022, 12, 3498, doi:10.3390/ani12243498.

Ce chapitre a pour objectif d'établir des seuils d'asymétrie qui discriminent avec la meilleure sensibilité et spécificité les chevaux sains et les chevaux présentant visuellement une boiterie d'un membre au trot en ligne droite, dans le cadre d'une consultation vétérinaire. En effet, une difficulté principale d'utilisation clinique des systèmes de quantification de boiterie est l'interprétation des données (cf. Chapitre 1.3.5). Les vétérinaires ont besoin de valeurs repères pour juger si le cheval est asymétrique ou si sa symétrie est dans les normes. L'objectif de cet article est de fournir des conseils d'utilisation préliminaires pour l'interprétation des valeurs d'asymétrie obtenues au trot en ligne droite lors d'un examen locomoteur.

Les courbes Receiver Operating Characteristic (ROC) utilisés dans cette étude pour l'analyse des données et l'établissement des seuils, sont expliqués schématiquement dans la Figure 29.

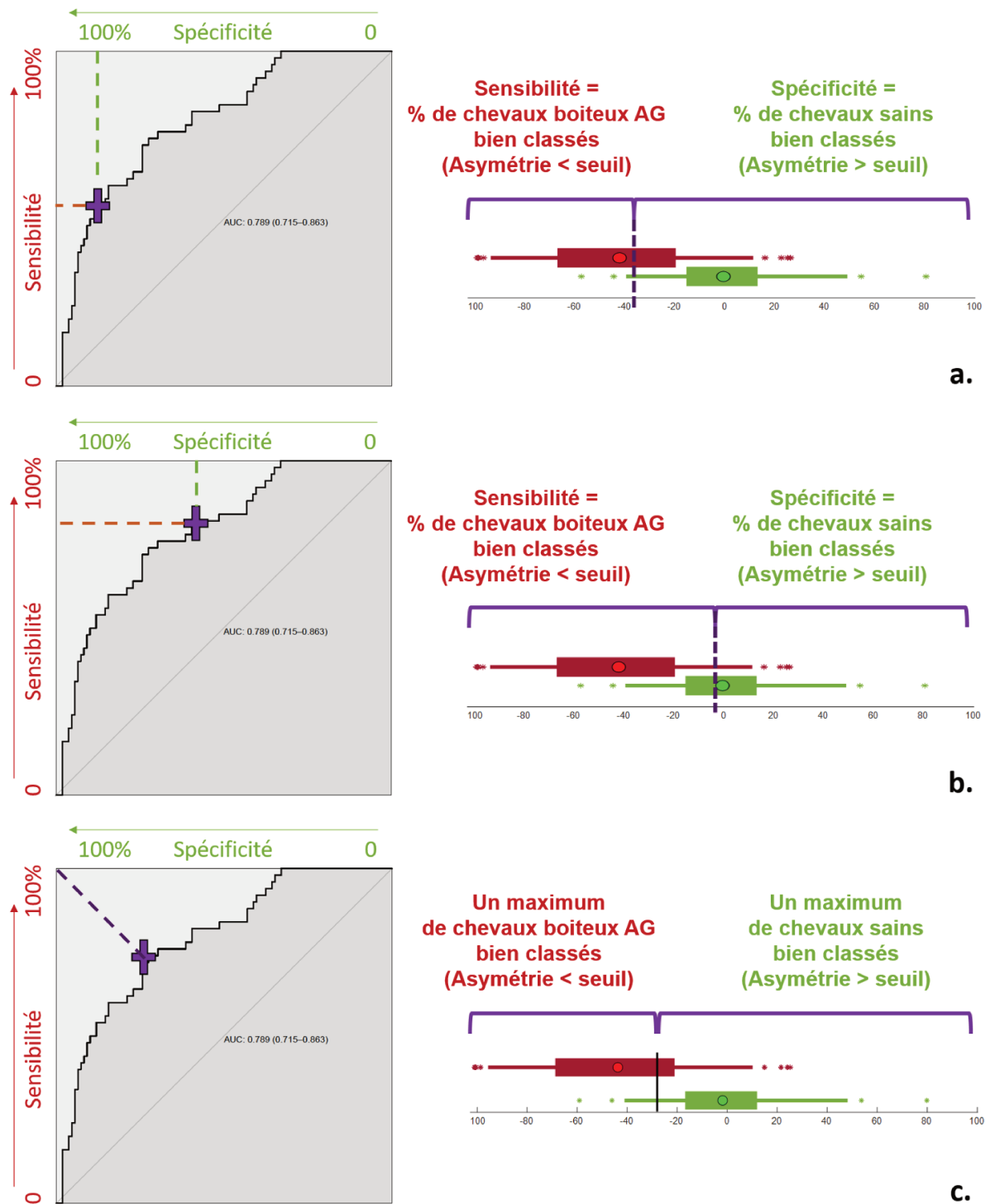


Figure 29 Schéma explicatif de l'analyse des données dans les Chapitres 5 et 6 avec des courbes Receiver Operating Characteristic (ROC) et l'établissement des seuils. a : Un seuil de valeur d'asymétrie faible est testé, il correspond à 1 point sur la courbe ROC avec une faible sensibilité et une haute spécificité. b : Un seuil de valeur d'asymétrie haute est testé, il correspond à 1 point sur la courbe ROC avec une haute sensibilité et une faible spécificité. c :

Le seuil optimal est la valeur seuil correspondant au point de la courbe ROC ayant une distance minimale avec le coin supérieur gauche.

La partie « Materials and methods » présentée dans l'article d'origine a été volontairement écourtée sur la description d'EQUISYM® et sur les calculs des indices d'asymétrie, qui ont été détaillés au Chapitre 2.1.1, afin de limiter les répétitions. L'intégralité de l'article se trouve en *Annexe 3*.

5.1 Introduction

Movement asymmetry is commonly used as an indicator of locomotor disorders by horses. The aim of locomotor examination is to identify any impairment and to locate its source. Currently, lameness is visually evaluated by veterinarians. However agreement between veterinarians about lameness grade assessment is low, particularly for subtle lameness detection (Keegan et al., 2010; Starke & Oosterlinck, 2019). Modern gait analysis tools provide quantitative measures of asymmetry. The most versatile tool, the inertial measurement units (IMUs), can be used in a clinical setting (Marin, 2020; Warner et al., 2010). The issue about the relationship between visual lameness assessment and gait asymmetry measurement systems has been raised. Asymmetry of vertical displacement of the head and pelvis has shown relevant increase with induced lameness (Buchner et al., 1996a; Keegan et al., 2001; Kramer et al., 2004). But even horses perceived by the veterinarian to be sound have demonstrated physiological asymmetrical gait (Greve et al., 2017; Kallerud et al., 2021; Scheidegger et al., 2022). Despite the known capacity of withers asymmetry for detecting compensatory movements, it has been studied relatively less than the head (Reed et al., 2020; Rhodin et al., 2018). In this context, thresholds of asymmetry parameters which correspond to visual evaluation of lameness by veterinarians have been studied. Asymmetry thresholds of the head (>6 mm) and the pelvic (>3 mm) vertical displacement were used for the first time by McCracken et al. (2012). They were probably based on a confidence interval calculated with two repeated measures on 236 horses (Keegan et al., 2011). These thresholds have been adjusted to the method of data construction used in other IMU systems (Pfau et al., 2016). A growing number of studies have used these thresholds as an objective lameness detection (Kallerud et al., 2021; Reed et al., 2020; Rhodin et al., 2018). However numerous asymmetry values of sound horses have been over these thresholds (Kallerud et al.,

2021; MacKechnie-Guire & Pfau, 2021; Rhodin et al., 2016). This might be explained by undetected subclinical, pain-mediated disease or by biological variation, but no consensus has yet been reached (Serra Bragança et al., 2018; Weeren et al., 2017). Recently, a discrimination method of statistical analysis was applied on 25 Thoroughbred racehorses to redefine higher thresholds, (14.5 mm for the head and 7.5 mm for the pelvis) (Pfau et al., 2020). In this study, the focus was on specificity because the objective was to screen horses before racing. These results have given guidelines but require further investigations with heterogeneous horses and lameness types using a clinical environment faced by practitioners. The goals of this clinical observational study were (i) to establish which asymmetry indices have the best sensitivity and specificity to reflect the visual assessment of singlelimb lameness made by expert clinicians as part of their routine practice. (ii) Then, for the relevant indices, the aim was to determine the threshold of lameness detection and lame limb identification. This first study was limited to the following conditions: at trot, in hand, on a straight line and on a hard surface.

5.2 Materials and Methods

This clinical observational retrospective study was approved by the clinical research ethics committee (ComERC n°2022-01-19).

5.2.1 Horses

This study was conducted on horses ($n = 224$), presented at a clinic for locomotor evaluation from August 2019 until October 2021. The sample was composed of 46% females, 47% geldings and 7% stallions; 48% Selle Français, 7% KWPN, 5% trotters and 40% other breeds; 62% showjumpers, 11% dressage, 10% eventing, and 17% other disciplines; aged from 2 to 20 years (mean \pm SD, 9 ± 3 years).

5.2.2 Locomotor Examination

After collecting the anamnesis and performing the examination of the locomotor system, the veterinarian evaluated the horse locomotion without warm-up. As part of the dynamic locomotor examination, horses were trotted by their owner/groom on a straight line of 25 meters long. The handler was asked to run at adequate speed and

to keep a steady pace. The ground surface was made of asphalt. Visual evaluation was performed by one of the five expert veterinarians graduated as DESV (French certification as a specialist in equine locomotor pathology) and certified ISELP (International Society of Equine Locomotor Pathology). Based on this evaluation on the straight line, horses were classified into five groups: right forelimb (RF) lame, left forelimb (LF) lame, right hindlimb (RH) lame, left hindlimb (LH) lame, and sound horses. In total, 381 horses were screened and were evaluated lame on a straight line. Among them, 209 horses showed lameness grade ranging between 2/10 (inclusive) and 6/10 (inclusive) on a 11-grades scale equivalent to the UK scale (where 0 is: Sound and 10 is: Non-weight bearing lameness) (Arkell et al., 2006; Dyson, 2011; May & Wyn-Jones, 1987). Horses showing lameness on multiple limbs on the straight line were excluded (n = 33). With these criteria, 67 horses showed RF lameness, 62 horses showed LF lameness, 23 horses showed RH lameness, and 23 horses showed LH lameness. Flowchart is provided in Figure 30. Lameness grades included in each group are summarized in Tableau 6

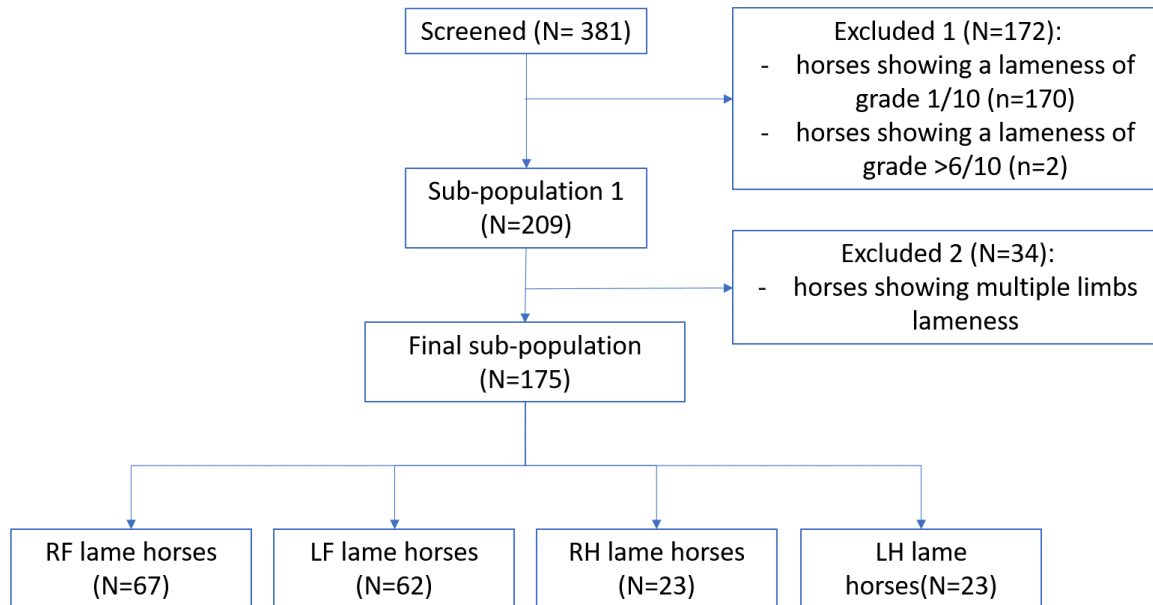


Figure 30 Flowchart of the exclusion/inclusion criteria of the screened horses, which were visually considered lame on a straight line by an expert veterinarian during his routine practice

Tableau 6 Number of horses showing a lameness depending on the location and the grade according to the 11-grades UK lameness scale. Mean \pm SD1 of lameness grade in each lame horses group.

Clinical lameness grade	2/10	3/10	4/10	5/10	6/10	Total	Mean \pm SD
Right Forelimb lameness	35	9	17	4	2	67	1.5 \pm 0.7
Left Forelimb lameness	40	9	7	4	2	62	1.4 \pm 0.8
Right Hindlimb lameness	7	4	11	0	1	23	1.7 \pm 0.5
Left Hindlimb lameness	7	6	5	1	4	23	1.8 \pm 0.6

Forty-nine horses were included in the group of “sound” horses. These sound horses have been presented at the clinic for pre-purchase examination or for gait evaluation prior to further training. In this group were included individuals who met all of the following criteria (1) and (2). (1) The sound horses were in training and judged by their owners to be capable of performing all the exercises required for their sport level. (2) A full locomotor examination of these horses by an expert clinician revealed no abnormalities deemed significant under any of the examination conditions. This

examination included: walk, trot on a hard circle at both reins, on a hard straight line, 4 flexion tests (one for each limb), trot on a soft circle at both reins.

5.2.3 Data collection

During the locomotor examination, as part of the clinical routine, horses were systematically equipped with the EQUISYM® (Arioneo, LIM France, Nouvelle-Aquitaine, France) system which recorded 2 trot-ups, corresponding to a mean of 14.7 ± 7.8 trot strides on a straight line.

5.2.4 Data processing

Based on the vertical displacement of the head ($_H$), withers ($_W$) and pelvis ($_P$) occurring along a stride, 4 variables were calculated for each sensor location. The following Asymmetry Indexes (AI), expressed as a percentage of the maximal range of motion within a stride, were used to compare left vs right part of the stride (Figure 30): AI-Min was the left-right difference of the lowest point of the vertical excursion; AI-Max was the left-right difference of the highest point of the vertical excursion; AI-up was the left-right difference of the upward range of motion during the propulsion phase; and AI-down was the left-right difference of the downward range of motion during the damping phase.

All calculations were performed with custom-made Matlab2020a (The MathWorks, Natick, MA, USA) scripts.

5.2.5 Data analysis

Mean and Standard Deviation (SD) were calculated from data collected in each group. Normality has been assessed using graphical methods (Oppong & Agbedra, 2016). Open software RStudio (RStudio Inc., Boston, MA, USA, version 4.1.3) was used, including the packages ROCR, pROC and boot. The four AIs calculated from head, withers and pelvis were analysed. Receiver Operating Characteristic (ROC) curves were plotted to discriminate each lame limb group (RF, LF, RH, LH) from the control group (sound horses). Area Under Curve (AUC) of the ROC curves was calculated. Then, thresholds with highest specificity and sensitivity using the top-left method were calculated. The top-left method involves choosing the threshold related to the curve

point closest to the upper-left corner of the graph. 95% confidence interval (95% CI, which values are expressed into [;] in the text) was obtained from the repartition of the best specificities and sensitivities calculated for 400 samples, using the bootstrap method based on resampling to estimate the confidence interval (Saporta, 2008). In this study, indexes were considered having good discrimination capacity if the sum of sensitivity and specificity was strictly higher than 150% (Power et al., 2013).

5.3 Results

5.3.1 Descriptive results

Mean \pm SD for each AI and for each horse group are summarized in Tableau 7 and boxplots are plotted in Figure 37.

Tableau 7 Mean \pm standard deviation (SD) of Asymmetry Index (AI) of the head, withers and pelvis in sound, right forelimb (RF) lame, left forelimb (LF) lame, right hindlimb (RH) lame and left hindlimb (LH) lame horses trotting on a hard straight line

Location	AI ¹	Sound	RF ²	LF ³	RH ⁴	LH ⁵
Head (_H)	AI-min_H (%)	-7 \pm 29	34 \pm 30	-41 \pm 38	22 \pm 18	-27 \pm 33
	AI-max_H (%)	-4 \pm 12	10 \pm 17	-1 \pm 27	-2 \pm 16	-1 \pm 27
	AI-up_H (%)	-11 \pm 29	44 \pm 36	-42 \pm 36	21 \pm 21	-28 \pm 36
	AI-down_H (%)	-2 \pm 29	31 \pm 35	-29 \pm 37	25 \pm 21	-19 \pm 32
Withers (_W)	AI-min_W (%)	-3 \pm 8	16 \pm 15	-17 \pm 18	-6 \pm 8	9 \pm 13
	AI-max_W (%)	2 \pm 8	8 \pm 9	-5 \pm 14	-2 \pm 7	6 \pm 12
	AI-up_W (%)	-1 \pm 9	24 \pm 20	-22 \pm 14	-7 \pm 13	15 \pm 18
	AI-down_W (%)	-3 \pm 11	9 \pm 14	-10 \pm 24	-4 \pm 7	2 \pm 15
Pelvis (_P)	AI-min_P (%)	6 \pm 8	1 \pm 8	7 \pm 10	16 \pm 12	-13 \pm 19
	AI-max_P (%)	-1 \pm 9	-8 \pm 11	6 \pm 12	14 \pm 10	-25 \pm 16
	AI-up_P (%)	5 \pm 13	-7 \pm 15	13 \pm 16	30 \pm 17	-38 \pm 27
	AI-down_P (%)	5 \pm 11	7 \pm 11	0 \pm 14	1 \pm 15	10 \pm 18

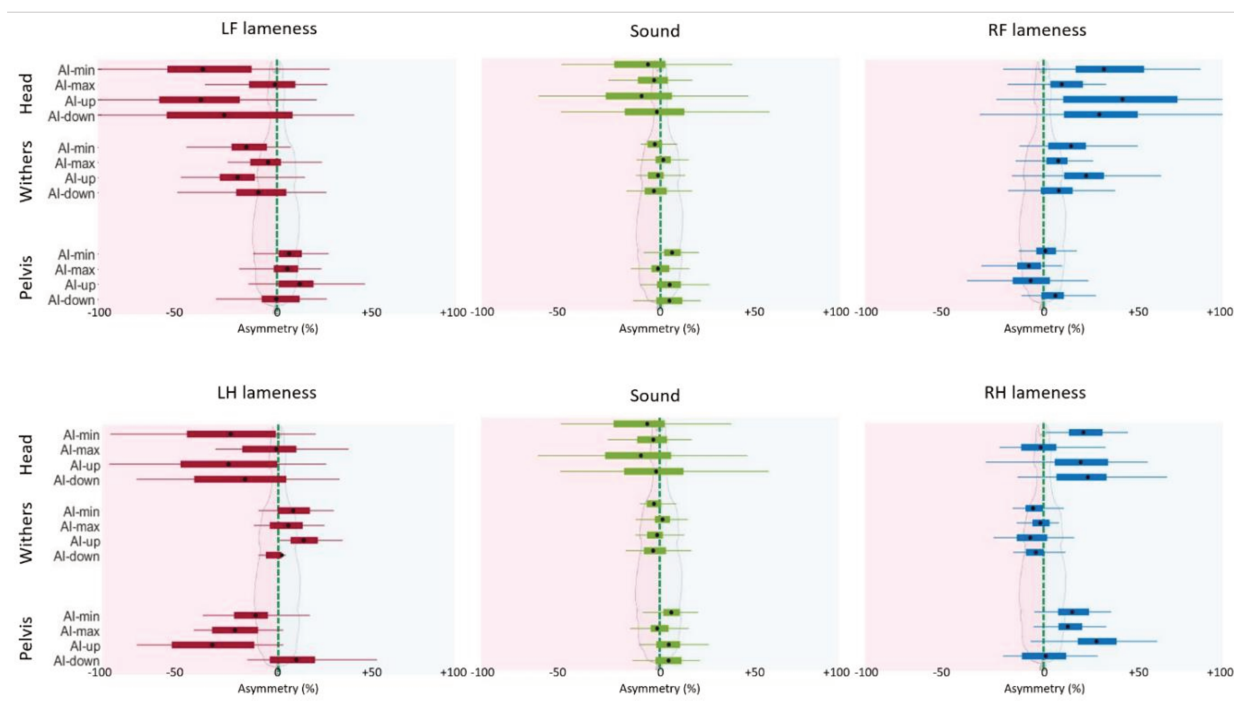


Figure 31 Boxplots of Asymmetry Index (AI) in % for sound, left forelimb (LF), right forelimb (RF), left hindlimb (LH) and right hindlimb (RH) lame horses. The black dot represents the mean, the 2 extremities of the box are 25th and 75th percentiles, and extremities of the whiskers represent extreme data points without considering outliers. Negative value represents smaller movement on the left limb

Means of the AIs in sound horses were close to 0% of asymmetry, particularly for the withers (AI-min = $-3\% \pm 8\%$; AI-max = $2\% \pm 8\%$; AI-up = $-1\% \pm 9\%$ and AI-down = $-3\% \pm 11\%$). The head (AI-min = $-7\% \pm 29\%$ and AI-up = $-11\% \pm 29\%$) and pelvis (AI-min = $6\% \pm 8\%$, AI-up = $5\% \pm 13\%$ and AI-down = $5\% \pm 11\%$) showed higher absolute mean values than the withers. The negative sign of AIs for the withers and the positive sign of AIs for the pelvis expressed reduced range of movement during the LF and RH stance phase.

RF lame horses showed higher mean values (sign of a stronger reduction of the movement on the right) than sound horses for all AIs of the head and withers, and discrete lower mean values (sign of a stronger reduction of the movement on the left) for all AIs of the pelvis, except AI-down_P. Like a mirror, LF lame horses showed lower

mean values than sound horses for all AIs of the head and withers, and higher mean values for all AIs of the pelvis, except AI-max_H and AI-down_P.

Horses with RH lameness showed higher mean values (sign of a stronger reduction of movement on the right) than sound horses for all AI of the head and pelvis, except AI-down_P, and showed discrete lower mean values (sign of a stronger reduction of movement on the left) for all AIs of the withers. Like a mirror, LH lame horses showed lower mean values than sound horses for all AIs of the head and pelvis, except AI-max_H and AI-down_P, and they showed higher mean values for all AIs of the withers.

5.3.2 Forelimb lameness discrimination

ROC curves are presented in Figure 32 for forelimbs lameness discrimination.

Calculated from these ROC curves, AUC, best sensitivity and specificity, and threshold associated are summarized in Tableau 8. ROC curves for RF lameness discrimination showed highest AUC values of 91% [95% CI, 85;96] (AI-up_W), 90% [84;95] (AI-up_H), 90% [83;95] (AI-min_W), and 86% [78;93] (AI-min_H). The lowest AUC values were of 55% (AI-down_P), 70% (AI-min_P), 72% (AI-max_P), and 72% (AI-down_W).

As well, ROC curves for LF lameness discrimination showed highest AUC values of 91% [85;95] (AI-up_W), 79% [71;87] (AI-min_W), 79% [71;87] (AI-min_H), and 79% [70;87] (AI-up_H). The lowest AUC values were of 48% (AI-max_H), 55% (AI-min_P), 58% (AI-down_W), and 61% (AI-down_P).

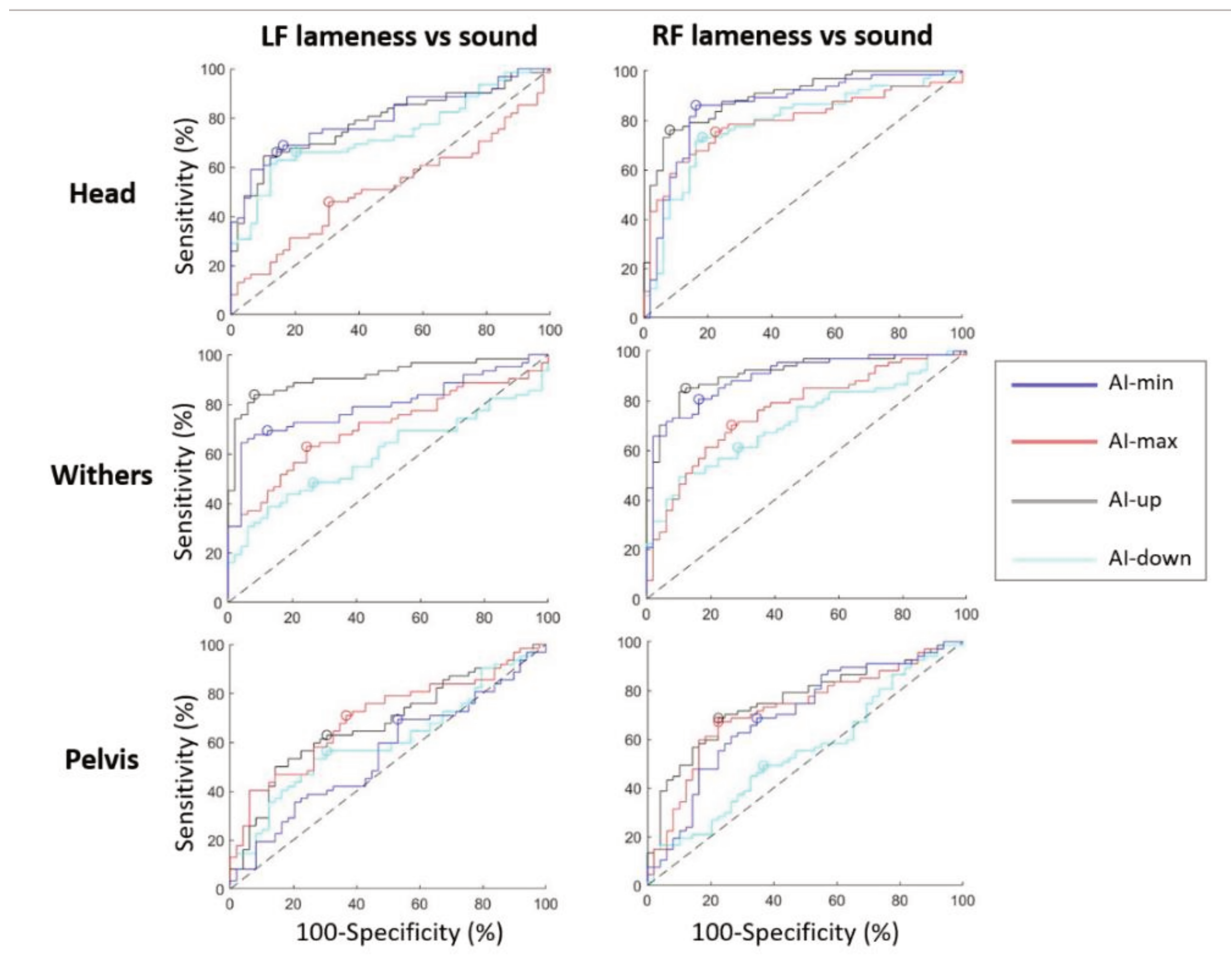


Figure 32 ROC curves discriminating horses with Left Forelimb (LF) lameness from sound horses; and discriminating horses with Right Forelimb (RF) lameness from sound horses, plotted for each sensor location (head, withers, pelvis); and plotted for Asymmetry Index: AI-min (blue), AI-max (red), AI-up (black) and AI-down (cyan). The best specificity and sensitivity point of each curve is represented by a circle. The dashed black line is the hypothesized ROC curve with discrimination capacity only due to perfect chance

Tableau 8 Area Under the Curve (AUC) of the Receiver Operating Characteristic (ROC) curve discriminating sound and forelimb lame horses, for each Asymmetry Index (AI). Best sensitivity, specificity and associated threshold were calculated using top-left method of ROC analysis. [95% Confidence Interval] were calculated plotting ROC analysis on 400 population resamplings (bootstraps). Results for which the sum of sensitivity and specificity is over 150% for both sides are in bold.

AI	AUC RF ¹ (%)	Sensitivity RF (%)	Specificity RF (%)	Threshold RF (%)	AUC LF ² (%)	Sensitivity LF (%)	Specificity LF (%)	Threshold LF (%)
AI-min_H	86 [78;93]	86 [78;95]	84 [73;92]	6 [-6;13]	79 [71;87]	69 [54;78]	84 [73;96]	-30 [-38;-24]
AI-max_H	79 [70 ;87]	75 [64 ;86]	78 [63 ;87]	5 [-1 ;10]	48 [38 ;59]	46 [29 ;53]	69 [53 ;87]	-10 [-24 ;-4]
AI-up_H	90 [84 ;95]	76 [62 ;81]	92 [85 ;100]	24 [14 ;45]	79 [70 ;87]	66 [51 ;76]	86 [74 ;100]	-36 [-49 ;-26]
AI-down_H	79 [70 ;87]	73 [61 ;81]	82 [70 ;94]	17 [10 ;25]	73 [65 ;83]	66 [56 ;79]	80 [66 ;85]	-25 [-29 ;-18]
AI-min_W	90 [83 ;95]	81 [68 ;90]	84 [71 ;93]	3 [-2 ;6]	79 [71 ;87]	69 [57 ;79]	88 [77 ;98]	-10 [-14 ;-8]
AI-max_W	77 [68 ;86]	70 [56 ;81]	73 [59 ;85]	6 [3 ;9]	71 [61 ;79]	63 [48 ;72]	76 [65 ;89]	-2 [-6 ;0]
AI-up_W	91 [85 ;96]	85 [77 ;93]	88 [78 ;95]	7 [1 ;10]	91 [85 ;95]	84 [74 ;91]	92 [84 ;100]	-10 [-13 ;-8]
AI-down_W	72 [61 ;80]	61 [41 ;75]	71 [49 ;89]	1 [-7 ;7]	58 [48 ;69]	48 [22 ;58]	73 [56 ;100]	-8 [-16 ;-4]
AI-min_P	70 [59 ;78]	69 [56 ;85]	65 [45 ;74]	4 [1 ;7]	55 [43 ;64]	69 [59 ;95]	47 [18 ;54]	5 [-2 ;7]
AI-max_P	72 [63 ;81]	67 [55 ;77]	78 [66 ;89]	-5 [-7 ;-4]	70 [60 ;79]	71 [58 ;86]	63 [44 ;73]	1 [-2 ;4]
AI-up_P	76 [67 ;84]	69 [55 ;78]	78 [66 ;90]	-3 [-7 ;0]	67 [57 ;77]	63 [52 ;77]	69 [48 ;76]	10 [6 ;13]
AI-down_P	55 [44 ;67]	49 [32 ;59]	63 [48 ;78]	7 [4 ;12]	61 [50 ;71]	56 [47 ;68]	69 [53 ;81]	1 [-3 ;6]

For RF and LF lameness respectively, thresholds of +7% [+1;+10] and -10% [-13;-8] of asymmetry for AI-up_W resulted in 85% [77;93] and 84% [74;91] sensitivity and 88% [78;95] and 92% [84;100] specificity respectively.

5.3.3 Hindlimb lameness discrimination

ROC curves are presented in Figure 33 for hindlimbs lameness discrimination. Calculated from these ROC curves, AUC, best sensitivity and specificity, and threshold associated are summarized in Tableau 9. ROC curves for RH lameness discrimination showed highest AUC values of 88% [77;95] (AI-max_P), 86% [74;95] (AI-up_P), 84% [75;93] (AI-min_H), 81% [71;91] (AI-up_H), and 80% [69;89] (AI-down_H). The lowest AUC values were of 51% (AI-max_H), 54% (AI-down_W), 59% (AI-max_W), 62% (AI-up_W and AI-min_W).

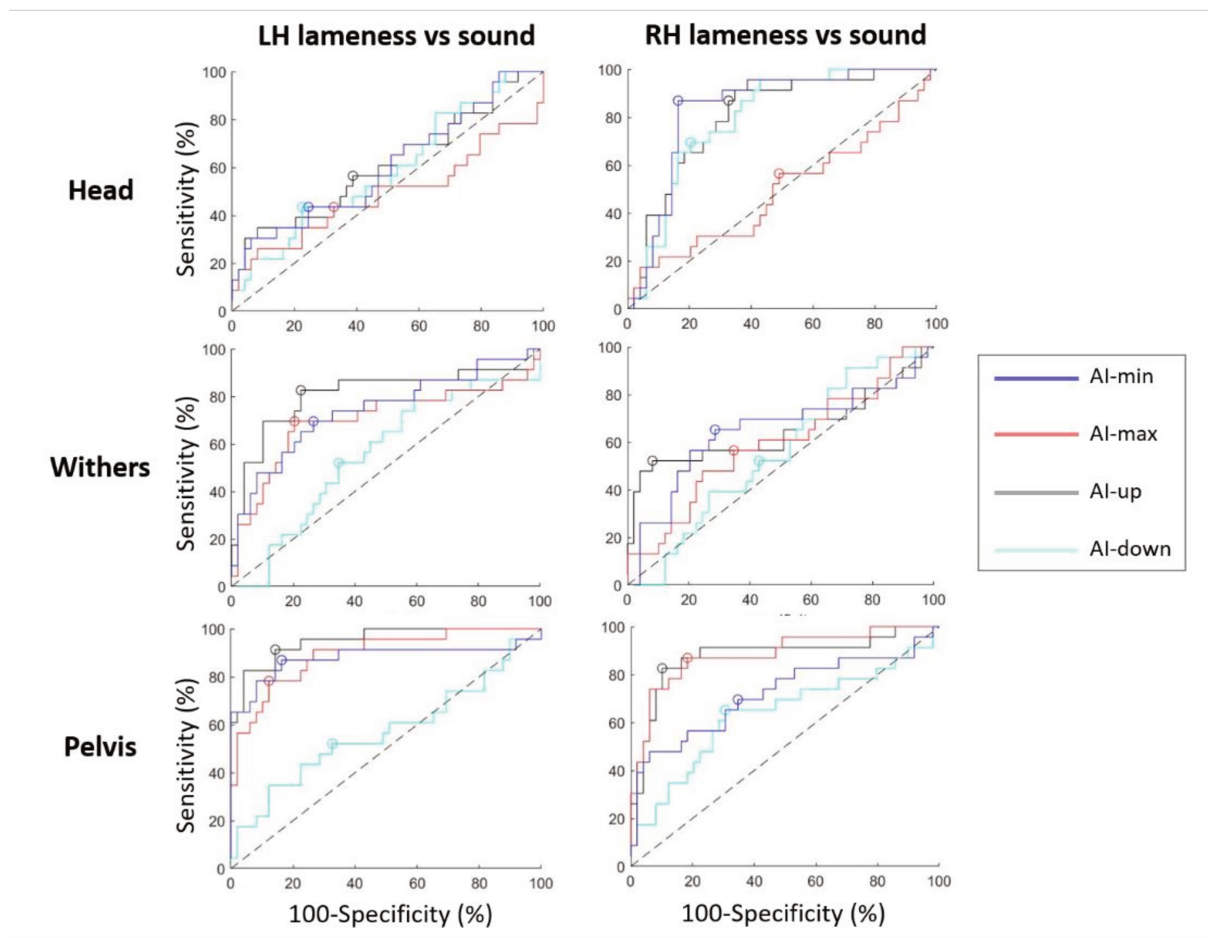


Figure 33 ROC curves discriminating horses with Left Hindlimb (LH) lameness from sound horses; and discriminating horses with Right Hindlimb (RH) lameness from sound horses, plotted for each sensor location (head, withers, pelvis); and plotted for Asymmetry Index : Al-min (blue), Al-max (red), Al-up (black) and Al-down (cyan). The best specificity and sensitivity point of each curve is represented by a circle. The dashed black line is the hypothesized ROC curve with discrimination capacity only due to perfect chance.

Tableau 9 Area Under the Curve (AUC) of the Receiver Operating Characteristic (ROC) curve discriminating sound and hindlimb lame horses, for each Asymmetry Index (AI). Best sensitivity, specificity and associated threshold were calculated using top-left method of ROC analysis. [95% Confidence Interval] were calculated plotting ROC analysis on 400 population resamplings (bootstraps). Results for which the sum of sensitivity and specificity is over 150% for both sides are in bold

AI	AUC RH ¹ (%)	Sensitivity RH (%)	Specificity RH (%)	Threshold RH (%)	AUC LH ² (%)	Sensitivity LH (%)	Specificity LH (%)	Threshold LH (%)
AI-min_H	84 [75;93]	87 [73;100]	84 [73;95]	8 [4;11]	60 [45;76]	43 [6;47]	76 [64;100]	-25 [-53;-16]
AI-max_H	51 [36;66]	57 [34;70]	51 [23;63]	-5 [-14;3]	48 [32;66]	43 [17;45]	67 [47;84]	3 [-2;24]
AI-up_H	81 [71;91]	87 [74;100]	67 [47;75]	-1 [-18;7]	60 [46;75]	57 [37;73]	61 [33;78]	-19 [-42;6]
AI-down_H	80 [69;89]	70 [41;77]	80 [67;100]	16 [8;35]	58 [43;73]	43 [8;49]	78 [66;100]	-22 [-53;-14]
AI-min_W	62 [47;76]	65 [46;82]	71 [55;83]	-6 [-10;-3]	75 [61;86]	70 [50;85]	73 [57;86]	0 [-4;3]
AI-max_W	59 [43;72]	57 [37;70]	65 [46;79]	0 [-4;3]	70 [55;84]	70 [51;88]	80 [66;92]	7 [4;9]
AI-up_W	62 [46;76]	52 [29;64]	92 [74;100]	-11 [-21;-5]	81 [67;92]	83 [70;100]	78 [59;87]	3 [-6;7]
AI-down_W	54 [41;68]	52 [20;64]	57 [37;75]	-5 [-12;-1]	55 [41;69]	52 [19;59]	65 [53;90]	-7 [-13;-4]
AI-min_P	72 [58;84]	70 [53;91]	65 [33;78]	10 [1;15]	89 [77;98]	87 [76;100]	84 [68;90]	-1 [-4;5]
AI-max_P	88 [77;95]	87 [75;100]	82 [64;88]	6 [2;8]	89 [80;96]	78 [59;86]	88 [78;100]	-10 [-19;-6]
AI-up_P	86 [74;95]	83 [65;91]	90 [82;100]	18 [16;27]	96 [90;99]	91 [82;100]	86 [69;91]	-7 [-12;2]
AI-down_P	64 [49;77]	65 [47;84]	69 [54;81]	0 [-3;4]	57 [42;71]	52 [33;63]	67 [47;82]	9 [2;17]

As well, ROC curves for LH lameness discrimination showed highest AUC values of 96% [90;99] (AI-up_P), 89% [80;96] (AI-max_P), 89% [77;98] (AI-min_P). The lowest AUC values were of 48% (AI-max_H), 55% (AI-down_W), 57% (AI-down_P), and 58% (AI-down_H).

For RH and LH lameness respectively, a threshold of +18% [+16;+27] and -7% [-12;+2] of asymmetry for AI-up_P resulted in 83% [65;91] and 91% [82;100] sensitivity, and 90% [82;100] and 86% [69;91] specificity. Thresholds of +6% [+2;+8] and -10% [-19;-6] of asymmetry for AI-max_P resulted in 87% [75;100] and 78% [59;86] sensitivity, and 82% [64;88] and 88% [78;100] specificity respectively.

5.3.4 Asymmetry thresholds of reliable indexes

With a sum of sensitivity and specificity over 150%, head (AI-min_H and AI-up_H) and withers (AI-min_W and AI-up_W) indexes discriminated the LF lame horses from sound horses. As well, head (AI-min_H, AI-max_H, AI-up_H and AI-down_H) and withers (AI-min_W and AI-up_W) indexes discriminated the RF lame horses from sound horses.

With a sum of sensitivity and specificity over 150%, withers (AI-up_W) and pelvis (AI-min_P, AI-max_P and AI-up_P) indexes discriminated the LH lame horses from sound horses. As well, head (AI-min_H and AI-up_H) and pelvis (AI-max_P and AI-up_P) indexes discriminated the RH lame horses from sound horses.

Thresholds and their 95% CI associated with a sum of sensitivity and specificity over 150% for both right and left lameness discrimination were plotted in Figure 34.

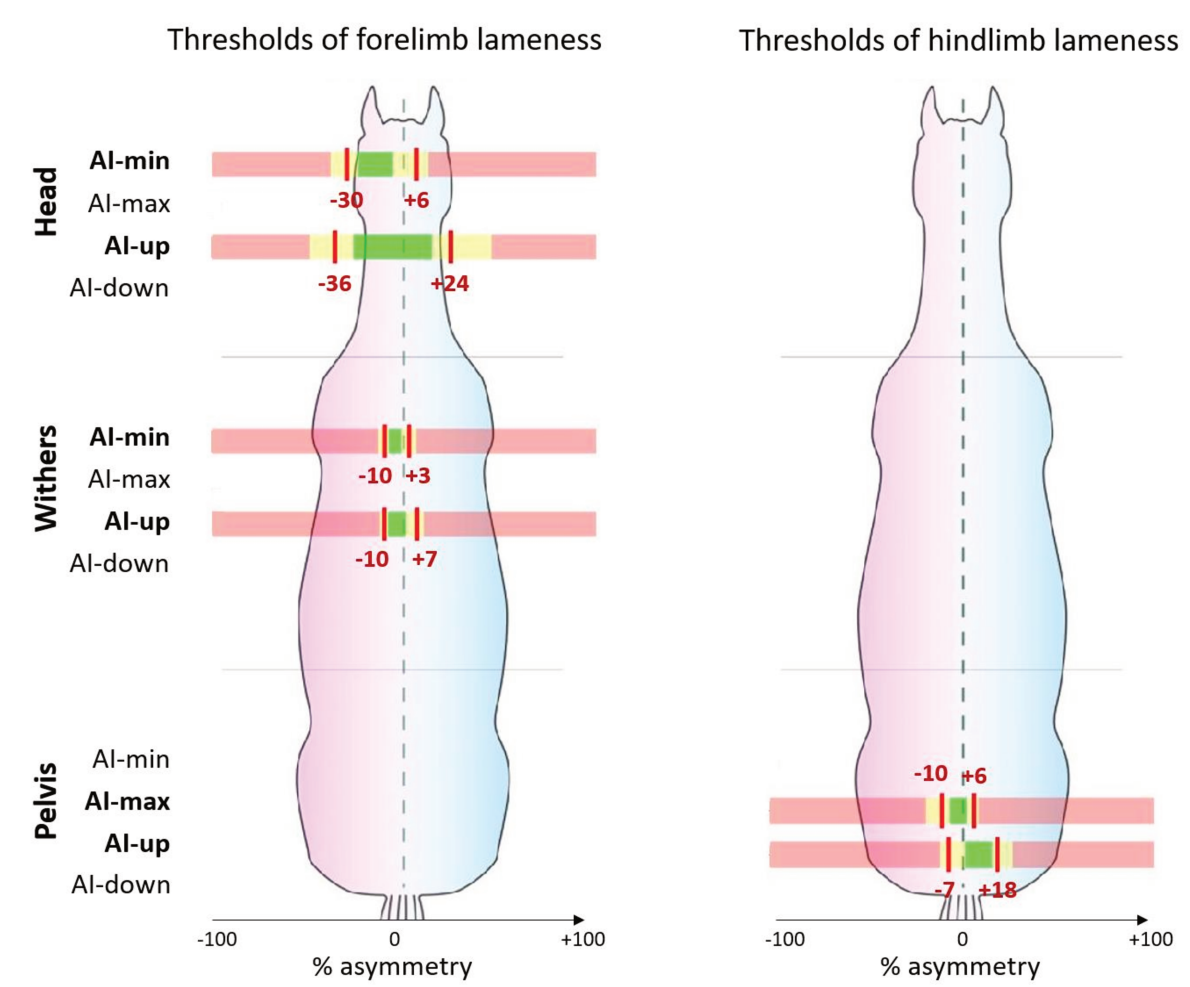


Figure 34 Thresholds (red line) of Asymmetry Indexes (AI) (in % of asymmetry) for forelimb and hindlimb lameness discrimination. Only the AIs with the sum of sensitivity and specificity over 150% for both right and left lameness are plotted. Three ranges of values are represented: yellow for 95% confidence interval (95% CI) around the threshold, green for values below the 95% CI ("sound" horses) and red for values beyond the 95% CI ("lame" horses).

5.4 Discussion

Description of AIs provided by the head, withers and pelvis from sound horses showed that almost no asymmetry was detected on the withers, whereas head and pelvis showed slightly lower range of movement during the RF-LH stance phase. In lame horses, the withers and pelvis showed reduced range of movement during the stance phase of respectively the front and hind lame limb. The head also showed reduced movement during the stance phase of a lame forelimb. Conversely, the head showed increased movement during the stance phase of a lame hindlimb.

Our study confirms the hypothesis that head and withers vertical displacements are indicators of forelimb lameness. Indeed, head indexes (AI-min_H, AI-up_H) and withers indexes (AI-min_W and AI-up_W) are the indexes with the highest sensitivity and specificity (sum of sensitivity and specificity greater than 150%) for discriminating horses with forelimb lameness from sound horses. Among them, AI-up_W discriminated forelimb lameness with the highest sensitivity (>84%) and specificity (>88%).

For hindlimb lameness, pelvic vertical displacement was the most consistent indicator. Withers and head vertical displacement were also modified, with compensatory movements but only indexes from the pelvis (AI-max_P and AI-up_P) discriminated both sides hindlimb lameness with sensitivity over 78% and specificity over 82%.

Among the four indexes (AI-up, AI-max, AI-min, AI-down) used in this study, it was shown that AI-down index has systematically a low sensitivity and specificity for discriminating both hindlimb and forelimb lame horses from sound horses. This result suggests that the AI-down index should not be considered as the most useful index in future work.

Main results give the following guidelines: associated with the highest sensitivity and specificity, AI-up_W discriminates LF lame horses under -10% of asymmetry and RF lame horses over +7% of asymmetry from sound horses. Associated with the highest sensitivity and specificity, AI-up_P discriminates LH lame horses under -7% of asymmetry and RH lame horses over +18% of asymmetry from sound horses. These observations confirm that the upward movement of the pelvis has the highest power to discriminate hindlimb lameness (Marunova et al., 2021).

Higher relevance of the withers data than the head data contradicts previous studies (Buchner et al., 1996a; Pfau et al., 2020). Head shows greater movement asymmetry than withers, helping the visual assessment for forelimb lameness. However, the head is subjected to random movements existing in restless horses (Hardeman et al., 2019; Kallerud et al., 2021; Keegan et al., 2001; Scheidegger et al., 2022). This study demonstrates that the withers movement provides useful and relevant information to detect forelimb lameness. Although having a lower reliability, head movement indexes provide additional information useful to differentiate forelimb and hindlimb lameness (Hopkins & Pfau, 2014; Rhodin et al., 2018).

Moreover, absolute threshold values of the head asymmetry were different in our study between the right and the left side of lameness discrimination (AI-up_H: +24% for RF vs -36% for LF; AI-min_H: +6% for RF vs -33% for LF). This difference may reflect different types of lameness between the RF and the LF lame horses in our reference population. This difference could also reflect an artefactual reduced movement of the head during the LF stance phase, compared to the RF stance phase for sound horse. Explanation could be found because horses were trotted in-hand on their left side by their owner or groom. This artefactual asymmetry may be induced by the handler despite instructions not to hold the head too firmly and to release the lunge. The head was either pulled forward, either hold backward depending on the spontaneous speed of the horse. This difference was not highlighted in other studies, which were maybe performed under more standardized conditions (Hopkins & Pfau, 2014). To a lesser extent, a similar phenomenon to the other side appeared on the pelvis in sound horses (AI-min_P mean of +6%; AI-up_P +5%; AI-down_P +5%).

Here AIs were divided by the range of movement, generating relative indexes expressed in %. Normalizing values seems natural in order to compare movement measured in a heterogeneous population, possibly including ponies. In addition, normalizing may lead to an easier comparison of asymmetry indexes processed by different gait analysis systems (Pfau et al., 2016; Serra Bragança et al., 2020). Previous studies have however expressed thresholds in millimeters (McCracken et al., 2012; Pfau et al., 2020). Pfau et al. (2020) found that the threshold of HDmin was 14.5 mm for forelimb lameness discrimination. As well, PDmax discriminated hindlimb lameness from 10 mm with a low sensitivity. Contrary to our results, PDmin was more

reliable than PDmax, and the head was more reliable than the withers. Pfau et al. focused on specificity in a selection context (racing Thoroughbreds for the purpose of 'lameness screening') where false positives should be avoided. Conversely, in a clinical context, a fair balance between sensitivity and specificity must be found to limit both false positives (inducing unnecessary costly investigations and anxiety of the owner) and false negatives. This choice may explain differences with the results of Pfau et al. (2020). Other differences were: the lack of differentiation between right and left lameness, the study of a homogeneous population and the subjective evaluation made by five assessors using video.

In the present study, we noticed that forelimb lameness also decreased the pelvic vertical range of motion during the lame limb stance phase. This observation has been previously noticed in other studies (Audigié et al., 2002; Pfau et al., 2018). LH lameness showed a small impact on the head but decreased the withers movement during RF stance phase. Contrary to LH lameness, RH lameness increased the head movement during LF stance phase. This supports the hypothesis that the head, the withers and the pelvis provide complementary information about the lameness location (Persson Sjödin et al., 2016; Rhodin et al., 2018).

The low number of hindlimb lame horses (23 RH and 23 LH) may induce a bias. Furthermore, all lameness were included regardless of the type of injury diagnosed. It is obvious that some indexes may be more or less modified according to the type of injury. To go further, more horses and specific groups for each type of diagnosed injury or clinical manifestation will be needed. This must be in the future roadmap.

Another limitation of this study is the clinical reference used to detect lame horses from non-lame horses and single limb lameness vs. multi-limbs lameness because this clinical assessment is recognized by definition as being subjective (Starke & Oosterlinck, 2019). In the present study, visual examination of lameness by expert clinicians in the real context of the clinical examination, in the field, has been chosen as a reference to establish thresholds and calculate their sensitivity and specificity. This choice must, of course, be discussed as it is well known that visual assessment by experts is subject to many uncertainties (e.g. lack of repeatability and reproducibility) (Keegan et al., 2010). Visual assessment is not considered a "gold

standard” in the present study, but only as a reference to what exists in the best possible conditions. In order for clinicians to appropriate the tools for quantifying locomotor asymmetries, it seems indeed necessary to give them an idea of the threshold values which, on these devices, correspond to what they are used to seeing and concluding subjectively with the classical (even imperfect) methods. This first step seems necessary because it is only once these benchmarks have been established that real progress can be made in interpreting the data from the quantification systems. The challenge here is to avoid the slightest asymmetry measured by a quantification system from being mistaken for lameness. It should indeed be remembered that the definition of lameness refers to a veterinarian's diagnosis and not to a machine. The machine can only be considered as a quantitative aid to a multi-factorial medical decision. In this study, the real condition of clinical routine was deliberately chosen in order to reflect the real-life examination of lame horses. Five highly experienced veterinarians were involved. Their experience and their identical and consistent method of assessment are likely to increase the agreement rate (Starke et al., 2021; Starke & May, 2017), although this result can be discussed (Keegan et al., 2010). The agreement could for example be slightly increased if the experts had not been informed of the owner's request. In this context, the lowest grade of lameness (1/10) was deliberately excluded because of weaker agreement for very subtle asymmetries (Keegan et al., 2010).

5.5 Conclusions

Although quite small 95% CIs were found, an increased number of horses would improve threshold accuracy. This study highlights the most relevant indexes (AI-up_W for forelimb lameness and AI-up_P for hindlimb lameness) and indicates an order of magnitude of the thresholds and their 95% CIs. These thresholds can be used as a first support to discriminate between lame (from grade 2/10) and non-lame horses, bearing in mind the value of the 95% CIs which prohibits the use of these thresholds as an absolute cut-off value. In any case, these indicators can only be interpreted in the light of a global clinical expertise taking into account that there is not only one type of lameness but multiple clinical manifestations of locomotor disorders depending on the type of lesion. Subtle lameness (1/10 grade) have not been included here; further studies are warranted to refine the thresholds for horses with subtle lameness.

Moreover forelimb and hindlimb lameness were analyzed separately and multi-limb lame horses were excluded. It should therefore be kept in mind that the inter-relationship between the movements of the head, withers and pelvis still requires further work. Future studies with multivariate analysis are needed to provide more information on the lame limb identification and relationship between the indexes in various clinical circumstances.

In the longer term, the application of this study is aimed at a wider range of conditions in veterinary practice. A main limitation is that all measures were recorded under specific and standardized conditions. In the following years, further data will be needed to refine lameness detection thresholds under conditions where physiological asymmetries are known to be higher (circles for instance) (Pfau et al., 2016).

5.6 Points à retenir

Les indices discriminant les boiteries antérieures avec les plus hautes sensibilité (Se) et spécificité (Sp) sont l'AI-up (Se>84% et Sp>88%) et l'AI-min (Se>69% et Sp>84%) du garrot et l'AI-up (Se>66% et Sp>86%) et l'AI-min (Se>69% et Sp>84%) de la tête. Les indices discriminant les boiteries postérieures avec les plus hautes sensibilité et spécificité sont l'AI-up (Se>83% et Sp>86%) et l'AI-max (Se>78% et Sp>82%) de la croupe. Les seuils et leurs intervalles de confiance pour les indices pertinents sont présentés dans la Figure 34. Ces seuils ont été normalisés avec l'amplitude de mouvement vertical et sont exprimés en pourcentage, contrairement aux précédents seuils établis (McCracken et al., 2012; Pfau et al., 2020).

Ces seuils et leur intervalle de confiance sont des aides à l'interprétation des valeurs d'asymétrie pour la détection des boiteries et l'identification du membre concerné, lors de l'utilisation clinique en ligne droite. Pour que l'utilisation de l'outil ne soit pas limitée à la ligne droite dans l'examen locomoteur, des seuils sont aussi à déterminer pour la locomotion sur les cercles.



CHAPITRE 6

Asymmetry Thresholds Representing the Visual Assessment of Forelimb Lameness by Expert Veterinarians on Horses Trotting in circles

Macaire, C., Hanne-Poujade, S., De Azevedo, E., Denoix, J.-M., Coudry, V., Jacquet, S., Bertoni, L., Tallaj, A., Audigié, F., Hattrisse, C., Hébert, C., Martin, P., Marin, F., & Chateau, H. (2023). Asymmetry Thresholds Reflecting the Visual Assessment of Forelimb Lameness on Circles on a Hard Surface. *Animals*, 13(21), 3319. <https://doi.org/10.3390/ani13213319>

La locomotion sur le cercle est essentielle à évaluer lors d'un examen locomoteur. En effet, le travail sur le cercle induit des forces spécifiques et peut révéler des boiteries ou apporter des informations complémentaires sur la localisation du site douloureux. L'asymétrie induite par cette condition empêche cependant l'utilisation des seuils établis en ligne droite et complique donc l'interprétation des valeurs d'asymétrie. L'objectif de ce chapitre est d'établir des seuils d'asymétrie pour détecter une boiterie antérieure au trot en cercle sur sol dur. L'intégralité de l'article publié dans la revue scientifique *Animals* est en Annexe 4.

6.1 Introduction

The evaluation of equine locomotion during a trot on a circle represents an essential component of the veterinary lameness assessment (Denoix, 2021). Indeed, the need to produce centripetal force on a circle and the resulting body lean angle induce specific forces on the limb and 3D joint movements compared to the straight line, like a higher loading force on the outside limb, and collateromotion and axial rotation in the digital joints (Chateau et al., 2013; Denoix, 2021). These specific biomechanical constraints on the anatomical structures are considered to be responsible for a different symptomatology between the circle and the straight line (Chateau et al., 2013). Therefore, this condition provides key information to aid clinical decision making (Denoix, 2021).

Nowadays, the assessment of lameness can be aided by objective gait analysis tools (Pfau et al., 2016; Serra Bragança et al., 2018; Weeren et al., 2017, 2018). Essential for the clinical application of these tools, asymmetry thresholds have been defined to distinguish between non-lame and lame gait (Kallerud, et al., 2021; Pfau et al., 2021; Pfau et al., 2016; Reed et al., 2020; Rhodin et al., 2017; Starke et al., 2012). McCracken et al. (2012) have determined a threshold of 6 mm for the difference in the vertical displacement of the head between the right stance phase and left stance phase for defining forelimb lameness on a straight line. Pfau et al. (2020) have established another value for this threshold of 14.5 mm using another objective gait analysis system and in the specific context of screening Thoroughbreds in race training. Lastly, asymmetry thresholds for indices normalized with the Range Of Movement (ROM) have been determined for discriminating visually assessed forelimb lameness on the

straight line (Macaire et al., 2022). In this study, it was shown that the asymmetry of the upward movement of the withers had the highest power to discriminate between sound and forelimb-lame horses. The associated thresholds were -7% asymmetry for left forelimb lameness and $+10\%$ asymmetry for right forelimb lameness. These thresholds were expressed in percentage contrary to the previous thresholds expressed in millimeters (McCracken et al., 2012; Pfau et al., 2020), as relative values can be seen as a better way of facilitating comparisons between horses of different sizes and between objective gait analysis systems with different signal processing (Pfau et al., 2016). Moreover, time-related indices of head movement have proven to be affected by forelimb lameness on a straight line (Audigié et al., 2002; Keegan et al., 2003; Kramer et al., 2004).

Asymmetry thresholds for lameness detection determined on a straight line are not applicable on a circle (Hardeman et al., 2019). Yet, their usefulness in this circumstance of locomotion is all the more crucial as a large proportion of the movements recorded on the circle must be considered as physiologically asymmetric (Hardeman et al., 2019; Pfau et al., 2016; Rhodin et al., 2013, 2016; Starke et al., 2012). It is therefore essential to highlight the boundary between the physiological asymmetric movement of the circle and an excessive asymmetric movement which should be considered pathological. Asymmetries measured in sound horses during lunging at trot have shown variation higher than previously defined threshold values (Hardeman et al., 2019; Pfau et al., 2016; Rhodin et al., 2013, 2016; Starke et al., 2012). This variation could be due to factors such as speed, radius and body lean angle, which have been identified as impacting the measurements (Greve et al., 2018; Pfau et al., 2012).

Thresholds for lameness detection on circles would help the interpretation of asymmetry values provided by an objective gait analysis tool during the entire locomotor examination. The objectives of this study were (i) to select asymmetry indices with the highest sensitivity and specificity to reflect the visual assessment of a veterinary specialist and then (ii) to define the optimal asymmetry thresholds for the inside and outside forelimb lameness detection on circles on a hard surface.

6.2 Materials and Methods

This clinical observational retrospective study was approved by the clinical research ethics committee (ComERC n°2022-01-19).

6.2.1 Horses and conditions

This study was conducted on horses that presented at the Equine Clinic (CIRALE) of the National Veterinary College of Alfort (Maisons-Alfort, France) for locomotor evaluation from April 2019 to February 2023. After collecting the anamnesis and performing the inspection and the palpation of the locomotor system, the veterinarian evaluated the horse locomotion without warm-up. As part of the dynamic locomotor examination, horses were trotted by their owner/groom on the lunge on a circle of 8–14 m diameter, on the left rein (counter clockwise direction) and then on the right rein (clockwise direction). The ground surface was made of hard rubber pavers. Visual evaluation was performed by one of the five veterinary specialists who graduated as DESV (French certification as a specialist in equine locomotor pathology) and were certified by the ISELP (International Society of Equine Locomotor Pathology).

In total, 574 horses were screened and were visually evaluated at lunge on the left rein and on the right rein on a hard surface. Among them, 95 horses showed left forelimb lameness (LF) and 122 horses showed right forelimb lameness (RF) on both reins. Horses showing a lameness grade of 1/10 or over 7/10 on a 0–10 grade scale equivalent to the UK scale (where 0 is sound and 10 is non-weight bearing lameness) on one rein were excluded (Arkell et al., 2006; Dyson, 2011; May & Wyn-Jones, 1987). After exclusion, 61 horses showed LF and 76 horses showed RF grade 2–7 lameness on both reins. Horses showing lameness on multiple limbs on one rein were excluded ($n = 8$). With these criteria, 57 horses showed LF lameness and 70 horses showed RF lameness on both reins. A flowchart is provided in Figure 35. Lameness grades included in each group on both reins are summarized in Tableau 10.

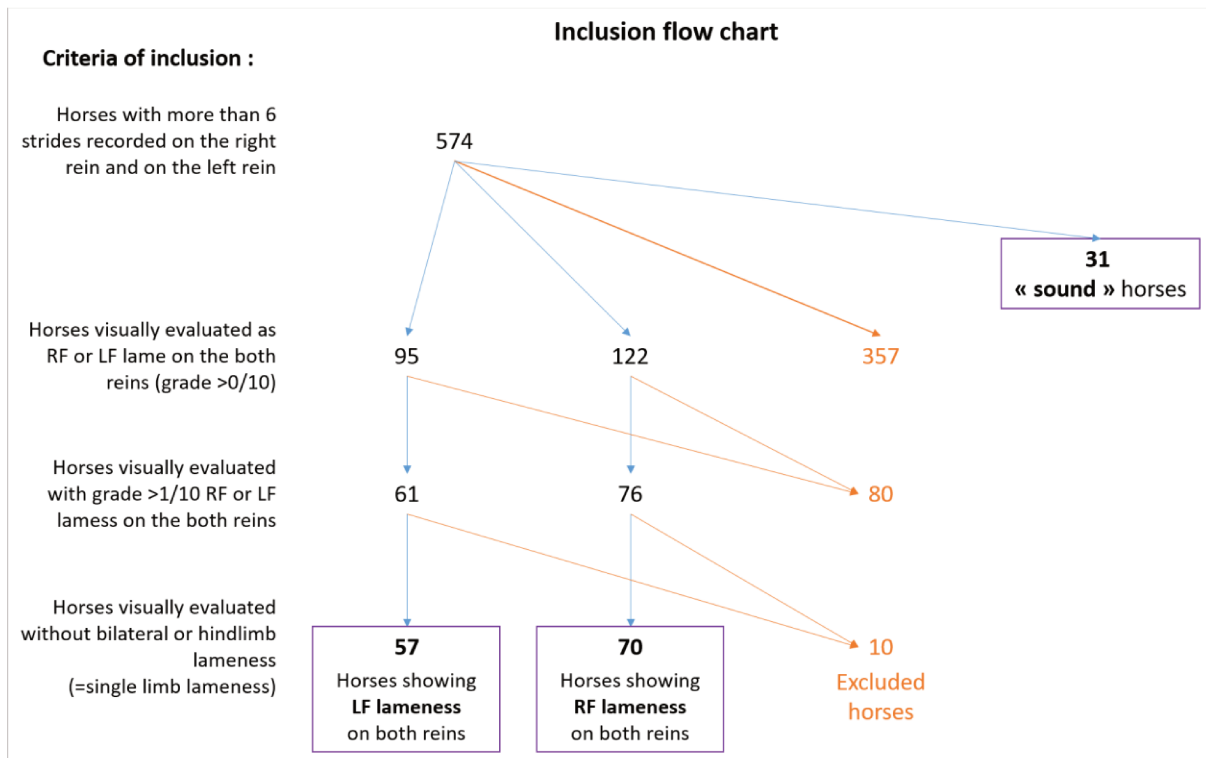


Figure 35 Flowchart of the exclusion/inclusion criteria of the screened horses, which were visually considered lame on the both reins on circle by an expert veterinarian during his routine practice

Tableau 10 Number of horses showing a lameness depending on the location and the grade according to the 11-grades UK lameness scale. Mean \pm standard deviation (SD) of lameness grade in each lame horses group

Horses	Rein	2/10	3/10	4/10	5/10	6/10	Total	Mean \pm SD ¹
Left Forelimb lameness	Left rein (internal lameness)	18	8	23	3	4	57	3.4 \pm 1.4
	Right rein (external lameness)	30	10	10	1	5	57	2.9 \pm 1.4
Right Forelimb lameness	Left rein (external lameness)	28	13	23	3	3	70	3.1 \pm 1.2
	Right rein (internal lameness)	23	14	19	5	8	70	3.4 \pm 1.4

Thirty-one horses were included in the group of “sound” horses according to the following criteria: (1) the horses were in training and judged by their owners to be capable of performing all the exercises required for their sport level; (2) three of the five veterinary specialists independently watched blinded videos of the horse at walk

and at trot, on a hard circle on both reins and on a hard straight line and did not notice any locomotion abnormalities in the entire video (<1/10 lameness grade).

6.2.2 Data collection

During the locomotor examination, as part of the clinical routine, horses were systematically equipped with the EQUISYM® system (Arioneo, LIM France, Le Bouscat, France), described by Macaire et al. (2022) and Timmerman et al. (2022). Data were recorded during approximately 20 s of trot per direction (clockwise/counterclockwise). The trot is of particular interest because a stride is composed of two diagonal beats whether on a straight line or circling to left or right.

6.2.3 Data processing

The data were processed following the methods described by Macaire et al. (2022). Briefly, based on the vertical displacement of the head (_H) and the withers (_W) occurring along a stride, the following asymmetry indices (AIs), expressed as a percentage of the maximal range of motion within a stride, were used to compare the left vs. right part of the stride (Figure 36): AI-Min, AI-Max and AI-up. Additionally, AI-Tmax was calculated as a time-related index, representing the left–right difference in the duration of the down–up cycle (the time between the two maxima) of the vertical displacement occurring before and after the stance phase. AI-Tmax was expressed as a percentage of the maximal time between two consecutive maxima. A positive AI value indicated a smaller movement amplitude or duration during the right stance than during the left stance, and a negative AI value indicated the opposite.

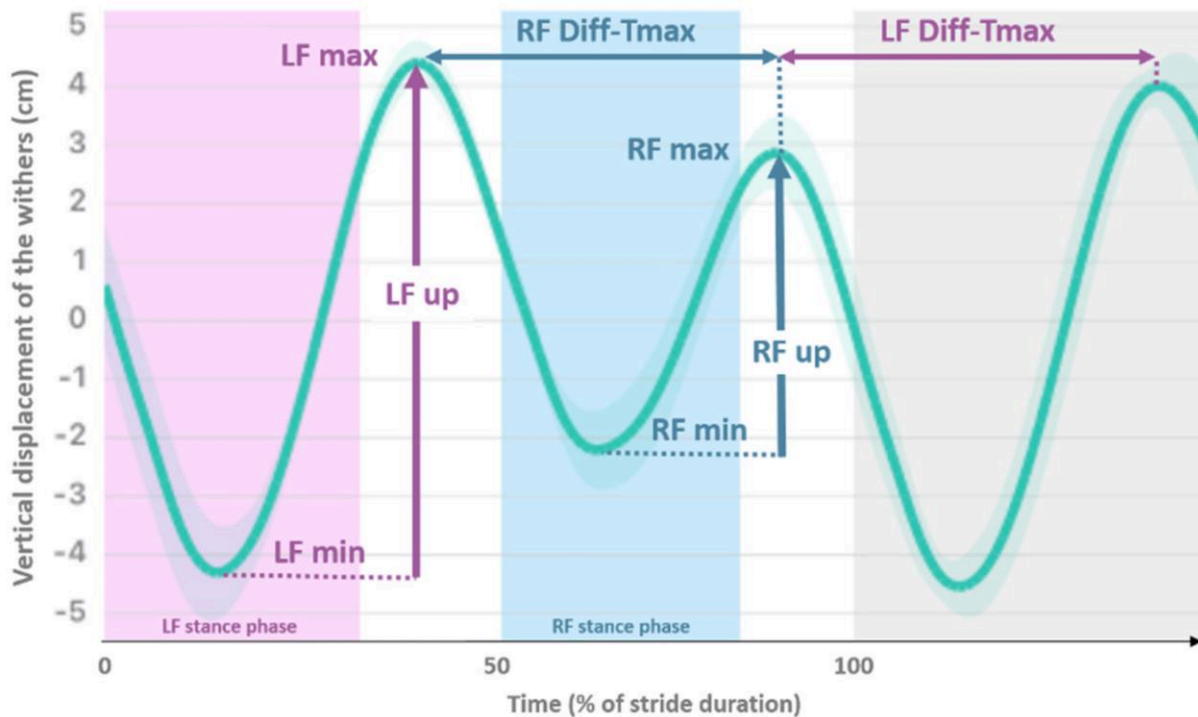


Figure 36 Mean vertical displacement (cm) of the withers plotted against time (expressed as percentage of stride duration) of a horse showing right forelimb (RF) lameness. Asymmetry Indices (AIs) are $AI_{-min} = RF_{min} - LF_{min} / LF_{up}$; $AI_{-max} = LF_{max} - RF_{max} / LF_{up}$; $AI_{-up} = LF_{up} - RF_{up} / LF_{up}$; and $AI_{-Tmax} = LF_{diffTmax} - RF_{diffTmax} / LF_{diffTmax}$. (LF - Left Forelimb).

6.2.4 Data analysis

Descriptive analyses, including mean and standard deviation (SD), were calculated for each variable, for each group (sound/lame) and for each condition (clock-wise/counter-clockwise direction). The four AIs calculated from the head and the withers were analyzed using the same methods as those described by Macaire et al. (2022). Normality was assessed using a graphical method (Oppong & Agbedra, 2016). Receiver Operating Characteristic (ROC) curves were plotted to discriminate, respectively, the right and left forelimb lame group (RF, LF) from the control group (sound horses) at lunge separately on the left and on the right rein. The AIs' discriminative power is indicated by the Area Under Curve (AUC) of the ROC curve. Given that $AUC < 50\%$ indicates discrimination no better than chance, higher AUC values (closer to 100%) indicate higher discriminative power. Finally, thresholds of indices with good discriminative power were calculated. In this study, indices were considered as having good discriminative power if the sum of sensitivity and specificity was strictly higher than 150% (Power et al., 2013).

6.3 Results

6.3.1 Descriptive results

The 158 horses included were 78 geldings, 72 females and 8 stallions; 94 Selle Français, 8 Zangersheide, 7 Hanoverian, 6 Koninklijk Warmbloed Paardenstamboek Nederland (KWPN), 6 French riding pony and 37 other breeds; 113 showjumpers, 12 dressage, 10 eventing and 23 other disciplines; and they were aged from 3 to 20 years (mean \pm SD, 9 ± 3 years). Age, gender, breed and disciplines are detailed for each horse in the Supplementary Materials (Table S1). A mean \pm SD of 20.4 ± 7.2 trot strides, 22.9 ± 5.8 on the right rein and 17.9 ± 7.6 on the left rein, were processed for each recording. The stride duration was 0.79 ± 0.05 s on both reins, respectively, and 0.80 ± 0.04 s for sound horses, 0.79 ± 0.04 s for RF lame horses and 0.78 ± 0.05 s for LF lame horses. The AIs of the head, the withers and the pelvis are detailed for each included horse in the Supplementary Materials: Table S2 shows AIs and ROM values measured on the left rein and Table S3 shows AIs and ROM values measured on the right rein.

The mean \pm SD for each AI and for each horse group are summarized in Table 2 and boxplots are displayed in Figure 2. In sound horses, AIs calculated from the head (AI-min_H, AI-max_H and AI-up_H) were negative on the left rein and positive on the right rein, reflecting a reduced vertical range of motion of the head during the inside forelimb stance phase. AI-min of the withers also showed a reduced minimum (AI-min_W) during the inside forelimb stance phase. On the contrary, AI-max of the withers was positive on the left rein and negative on the right rein, reflecting a reduced maximum after the outside forelimb stance phase. Finally, in sound horses, the AI-Tmax of the head and of the withers, and AI-up of the withers were close to 0% of asymmetry on both reins.

Tableau 11 Mean \pm SD of asymmetry indices (AIs) of the head and the withers in sound, left forelimb (LF) lame, right forelimb (RF) lame horses trotting on right rein and on left rein circles.

Location	AI	Right rein circle			Left rein circle		
		LF	Sound	RF	LF	Sound	RF
Head (_H)	AI-min_H (%)	-29 \pm 39	7 \pm 18	47 \pm 32	-49 \pm 26	-8 \pm 20	28 \pm 36
	AI-max_H (%)	-6 \pm 34	16 \pm 17	24 \pm 23	-22 \pm 28	-10 \pm 14	9 \pm 27
	AI-up_H (%)	-27 \pm 48	22 \pm 24	61 \pm 32	-63 \pm 28	-18 \pm 25	31 \pm 44
	AI-Tmax_H (%)	-15 \pm 23	3 \pm 9	28 \pm 25	-26 \pm 17	-2 \pm 10	15 \pm 21
Withers (_W)	AI-min_W (%)	0 \pm 22	19 \pm 10	36 \pm 20	-28 \pm 24	-14 \pm 11	4 \pm 18
	AI-max_W (%)	-26 \pm 16	-17 \pm 12	-8 \pm 16	15 \pm 22	18 \pm 8	26 \pm 13
	AI-up_W (%)	-26 \pm 25	2 \pm 12	27 \pm 22	-13 \pm 21	4 \pm 14	31 \pm 19
	AI-Tmax_W (%)	-7 \pm 9	0 \pm 3	6 \pm 9	-4 \pm 9	0 \pm 3	7 \pm 6

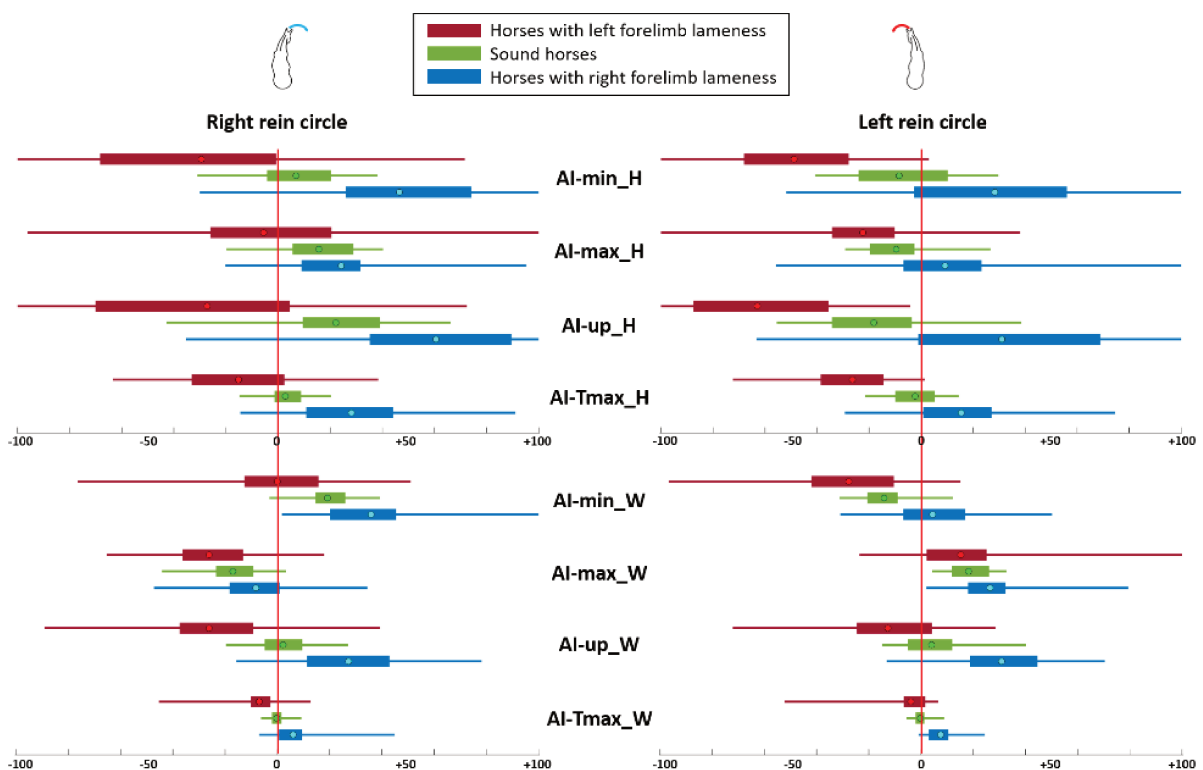


Figure 37 Boxplots of Asymmetry Indices (AIs) in percentage for sound horses and horses with a left forelimb lameness and right forelimb lameness. The dot represents the mean, the two extremities of the box are 25th and 75th percentiles, and extremities of the whiskers represent the minimum and maximum. A negative value reflects reduced movement or duration during the left limb stance, and positive value reflects reduced movement or duration during the right limb stance

RF-lame horses showed higher mean values (sign of reduced movement on the right) than sound horses for all AIs of the head and withers. On the opposite hand, LF-lame

horses showed lower mean values than sound horses for all AIs of the head and withers.

Horses with RF and LF lameness showed, respectively, positive and negative mean values (sign of reduced movement during the stance of the lame limb) for all AIs, except AI-max_W, when the lame limb was on the inside of the circle (RF at right rein and LF at left rein). When the lame limb was on the outside of the circle, AI-min_W was close to 0% of asymmetry.

6.3.2 Discrimination between lame horses with the lame forelimb on the inside of the circle and sound horses

ROC curves and associated results for the discrimination of forelimb lameness when the lame limb was on the inside of the circle (RF lameness on right rein and LF lameness on left rein) from sound horses are presented in Figure 3 and Table 3, respectively. The lowest AUC (lowest discrimination performance) value for the inside lame-ness detection was shown by the AI-max for the head ($AUC \leq 70\%$) and by the AI-max for the withers ($AUC \leq 67\%$). The indices with the highest AUC ($AUC \geq 83\%$) were in the following descending order: AI-min_H, AI-Tmax_H and AI-up_H for RF lameness on the right rein. For LF lameness on the left rein, the indices with the highest AUC ($AUC \geq 87\%$) were in the following descending order: AI-Tmax_H, AI-min_H and AI-up_H.

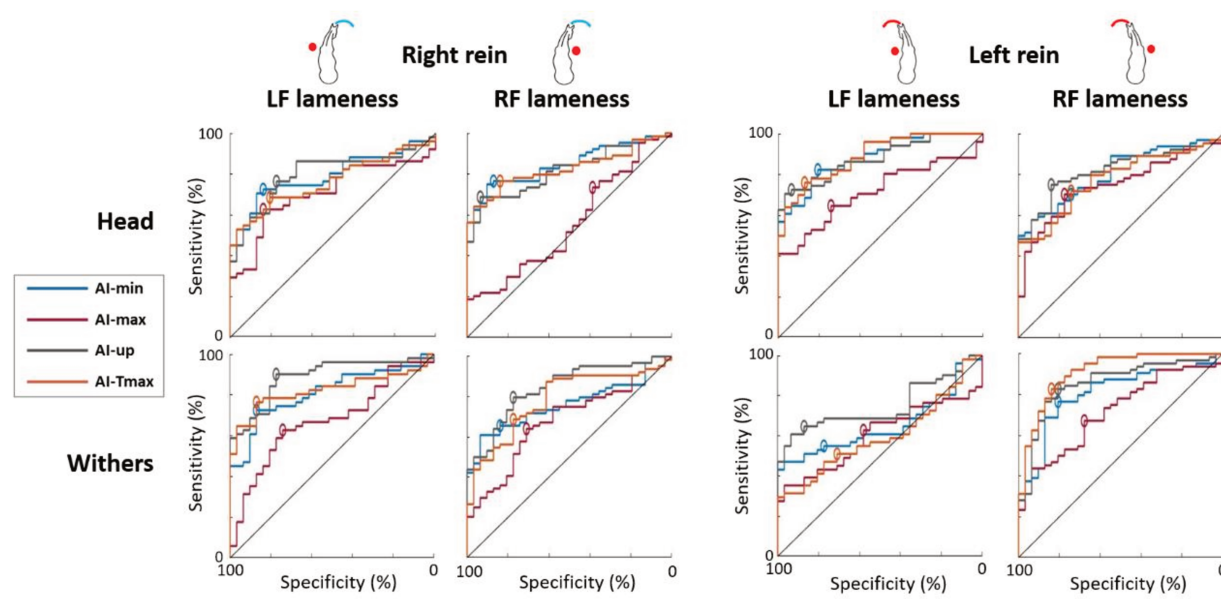


Figure 38 Receiver Operating Characteristic (ROC) curves discriminating horses with a constant Left Forelimb (LF) lameness from sound horses; and discriminating horses with a constant Right Forelimb (RF) lameness from sound horses, plotted for both reins on a circle. Tested Asymmetry Indices were AI-min (blue), AI-max (red), AI-up (grey) and AI-Tmax (orange). The highest specificity and sensitivity point of each curve is represented by a circle (top-left method). The black line is the hypothesized ROC curve with discriminative power only due to chance

Tableau 12 Area Under the Curve (AUC) of the Receiver Operating Characteristic (ROC) curve discriminating forelimb lameness when the lame limb was on the inside of the circle from sound horses on circles, for each of the Asymmetry Indices (AIs). The highest sensitivity (Se), specificity (Sp) and associated threshold (Threshold) were calculated using the top-left method of ROC analysis. The 95% confidence intervals [;] were calculated by using a Bootstrap method, plotting ROC analysis on 400 population resamplings. Results for which the sum of sensitivity and specificity is over 150% for both circles (left and right reins) are in bold

AI	Left forelimb lameness on the left rein (internal lameness on the left rein)				Right forelimb lameness on the right rein (internal lameness on the right rein)			
	AUC	Se	Sp	Threshold	AUC	Se	Sp	Threshold
AI-min_H (%)	89 [83;94]	82 [72;94]	81 [65;90]	-25 [-30;-17]	86 [78;92]	79 [70;89]	87 [75;96]	23 [18;27]
AI-max_H (%)	70 [60;80]	63 [47;76]	74 [57;89]	-17 [-25;-10]	57 [45;69]	74 [66;100]	39 [2;39]	9 [-11;12]
AI-up_H (%)	87 [80;93]	72 [56;80]	94 [82;100]	-49 [-71;-37]	83 [74;90]	69 [54;78]	94 [84;100]	49 [41;65]
AI-Tmax_H (%)	90 [83;96]	79 [66;88]	87 [76;98]	-14 [-19;-11]	84 [76;91]	79 [70;90]	84 [71;95]	10 [6;12]
AI-min_W (%)	66 [54;76]	53 [37;61]	87 [74;100]	-24 [-33;-19]	76 [67;86]	66 [52;77]	84 [69;97]	27 [24;32]
AI-max_W (%)	60 [49;73]	61 [46;83]	58 [23;71]	17 [11;25]	67 [56;77]	64 [48;74]	71 [56;88]	-11 [-15;-4]
AI-up_W (%)	76 [65;85]	67 [54;79]	81 [63;88]	-8 [-12;-3]	84 [76;91]	80 [69;92]	77 [62;88]	10 [4;14]
AI-Tmax_W (%)	61 [49;71]	60 [49;78]	61 [33;71]	-1 [-2;1]	79 [67;88]	67 [36;76]	77 [66;99]	2 [1;5]

6.3.3 Discrimination between lame horses with the lame forelimb on the outside of the circle and sound horses

The ROC curves and associated results for the discrimination of forelimb lameness when the lame limb was on the outside of the circle (LF lameness on right rein and RF lameness on left rein) from sound horses are presented in Figure 3 and in Table 4, respectively. The lowest AUC value for the outside lameness detection on the circle was shown by AI-max for the withers (AUC ≤ 71%) and by AI-max for the head (AUC ≤ 75%). The indices with the highest AUC (AUC ≥ 79%) were in the following descending order, AI-up_W, AI-Tmax_W, AI-up_H and AI-min_W, for LF lameness on the right rein. For RF lameness on the left rein, the indices with the highest AUC (AUC ≥ 81%) were in the following descending order: AI-Tmax_W, AI-up_W, AI-up_H and AI-min_W.

Tableau 13 Area Under the Curve (AUC) of the Receiver Operating Characteristic (ROC) curve discriminating forelimb lameness when the lame limb was on the outside of the circle from sound horses on circles, for each of the Asymmetry Indices (AIs). The highest sensitivity (Se), specificity (Sp) and associated threshold (Threshold) were calculated using the top-left method of ROC analysis. The 95% confidence intervals [;] were calculated by using a Bootstrap method, plotting ROC analysis on 400 population resamplings. Results for which the sum of sensitivity and specificity is over 150% for both circles (left and right reins) are in bold.

AI	Left forelimb lameness on the right rein (external lameness on the right rein)				Right forelimb lameness on the left rein (external lameness on the left rein)			
	AUC	Se	Sp	Threshold	AUC	Se	Sp	Threshold
AI-min_H (%)	79 [69;88]	70 [57;79]	84 [71;95]	-8 [-17;-1]	80 [73;88]	66 [45;75]	81 [63;98]	13 [0;34]
AI-max_H (%)	72 [60;82]	65 [50;75]	84 [73;99]	1 [-9;6]	75 [65;83]	70 [57;81]	77 [64;91]	-2 [-7;6]
AI-up_H (%)	81 [71;90]	77 [62;89]	77 [61;89]	7 [-9;22]	82 [74;89]	74 [62;81]	84 [73;97]	0 [-9;11]
AI-Tmax_H (%)	75 [65;85]	67 [55;79]	81 [65;91]	-3 [-7;4]	77 [68;85]	71 [57;82]	74 [59;88]	3 [-2;7]
AI-min_W (%)	79 [71;89]	72 [60;82]	87 [75;99]	13 [11;15]	81 [72;89]	76 [63;86]	81 [66;94]	-7 [-12;-1]
AI-max_W (%)	68 [57;79]	63 [49;75]	74 [59;88]	-23 [-28;-19]	71 [60;82]	66 [50;81]	68 [48;83]	22 [17;27]
AI-up_W (%)	88 [81;95]	89 [81;100]	77 [60;85]	-5 [-9;1]	86 [78;93]	83 [73;94]	81 [65;89]	13 [5;17]
AI-Tmax_W (%)	81 [73;90]	74 [61;83]	87 [76;99]	-3 [-4;-3]	91 [86;97]	84 [72;93]	84 [71;94]	2 [1;3]

6.3.4 Asymmetry thresholds of reliable indices

For discriminating sound horses from lame horses with the lame limb on the in-side of the circle, the indices with high sensitivity and specificity (sum of sensitivity and specificity greater than 150%) were three indices from the head (AI-up_H, AI-Tmax_H and AI-min_H). For discriminating forelimb lameness when the lame limb was on the

outside of the circle, the indices with greater sensitivity and specificity were three indices from the withers (AI-up_W, AI-Tmax_W and AI-min_W) and one from the head (AI-up_H).

Figure 39 represents the thresholds and their 95% CI associated with a sum of sensitivity and specificity over 150% for inside (Figure 39a) and outside (Figure 39b) lameness discrimination on both reins.

When comparing the absolute values of left rein and right rein thresholds for lameness discrimination when the lame limb was on the inside of the circle, the maximum difference between right and left rein was 4% of asymmetry for AI-Tmax_H (Figure 39a). When the lame limb was on the outside of the circle, the maximum difference between right and left was 8% of asymmetry for AI-up_W (Figure 39b).

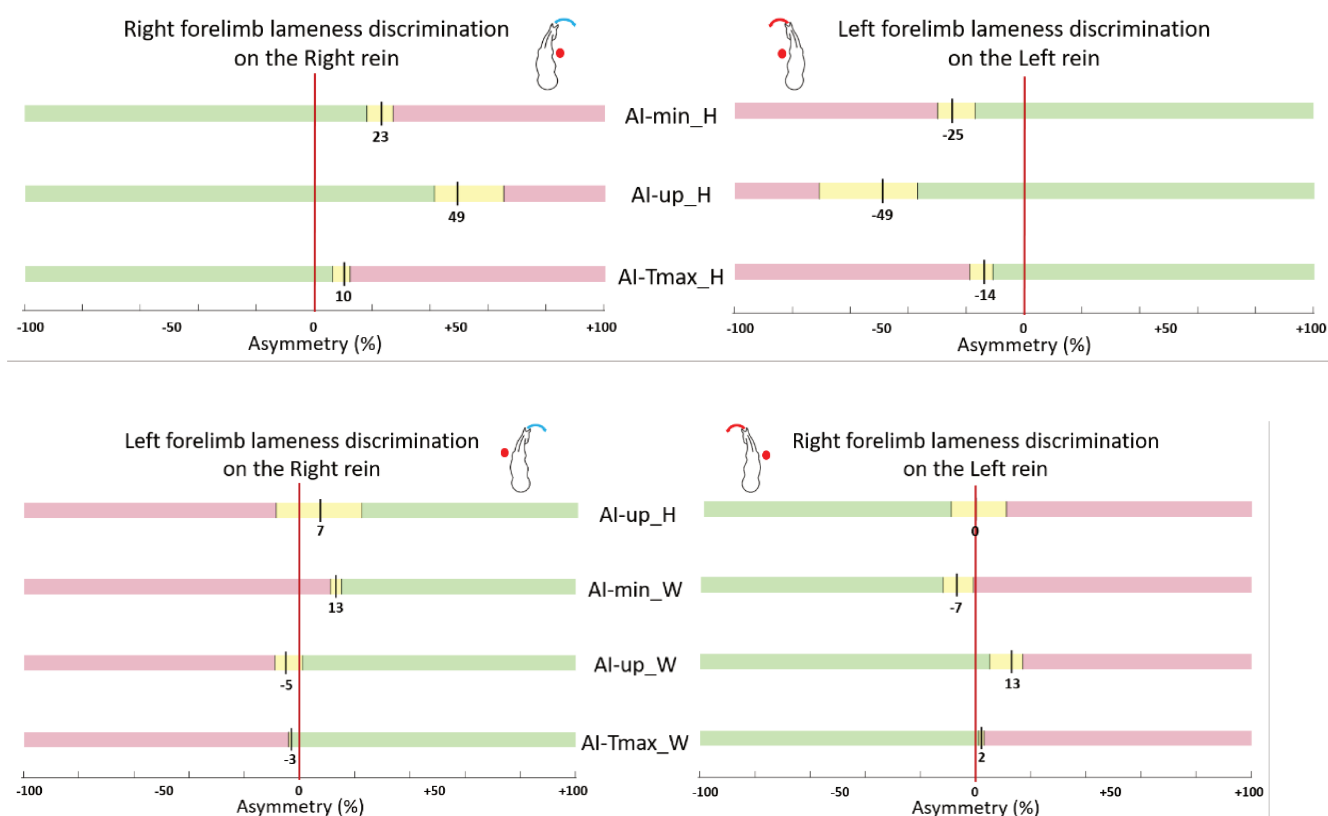


Figure 39 Thresholds (black line) of Asymmetry Indices (AIs) (in percentage of asymmetry) for lameness discrimination when the lame limb was on the inside of the circle (a) and when the lame limb was on the outside of the circle (b). Only the AIs with the sum of sensitivity and specificity over 150% for both right and left reins are plotted. Three ranges of values are represented: yellow for 95% confidence interval (95% CI) around the threshold, green for values below the 95% CI (“sound” horses) and red for values beyond the 95% CI (“lame” horses).

6.4 Discussion

Asymmetry Indices (AIs) measured on sound horses showed a reduced head and withers movement during the inside forelimb stance phase, except for the AI-max of the withers. This goes with a larger downward movement of the trunk and head towards the outside forelimb, confirming the results of previous studies (Rhodin et al., 2016; Starke et al., 2012). This physiological asymmetry observed on the circle means that we need to define the limit between a physiological asymmetry and an asymmetry that is amplified (or reduced) when a pathological phenomenon is superimposed.

Our study confirms the hypothesis that head and withers vertical displacements are indicators of forelimb lameness on the circle in a specific group of horses showing

single-limb lameness on both reins, excluding a lameness grade of 1/10. In addition, the present study reveals that when the lame limb is inside the circle, head movements have the highest discriminative power. Conversely, when the lame limb is outside the circle, withers movements have the highest discriminative power. Practically, the AI-min and AI-Tmax of the head discriminated forelimb lameness when the lame limb was on the inside of the circle with the highest sensitivity ($\geq 79\%$) and specificity ($\geq 81\%$) on both reins. AI-up and AI-Tmax of the withers discriminated forelimb lameness when the lame limb was on the outside of the circle with the highest sensitivity ($\geq 83\%$ and $\geq 74\%$, respectively) and specificity ($\geq 77\%$ and $\geq 84\%$, respectively) on both reins.

Among the four indices (AI-min, AI-max, AI-up and AI-Tmax) used in this study, AI-max has systematically the lowest sensitivity and specificity for discriminating horses showing forelimb lameness on both reins from sound horses on a circle. In contrast, a previous study measured a reduced maximum altitude of the head after outside forelimb lameness induction (Rhodin et al., 2013). One explanation could be the diversity of types of injuries affecting the included horses in our study. There are several possible explanations for this discrepancy. On the one hand, the reference population for the two studies is not identical since we chose to concentrate on the lameness visible on both clockwise and counter clockwise circles. On the other hand, the type of lameness analyzed in the study by Rhodin et al. (2013) was induced lameness (with a modified horseshoe) and not spontaneous lameness as in the present study.

Several studies describe variation in asymmetry but did not reach a consensus on the physiological asymmetry of sound horses induced by the circle (Pfau et al., 2016; Rhodin et al., 2013, 2016; Starke et al., 2012). Rhodin et al. (2013) concluded a reduced head movement for the outside forelimb (HDmin). In 2016, Rhodin et al. (2016) highlighted a non-uniform effect of the circle on the head. Other studies (Pfau et al., 2016; Starke et al., 2012) showed results similar to those of the present study concerning physiological head asymmetry on a circle with a reduced head movement during the inside forelimb stance. The recorded asymmetries of the withers vertical displacements on sound horses trotting on a circle are consistent with a previous study (Starke et al., 2012) and showed a lowered minimum during and a reduced maximum after the stance phase of the out-side forelimb. However, in the studies of Starke et al.

(2012) and Rhodin et al. (2016), the inclusion criteria were based on the straight line and did not exclude visible lameness on the circle, meaning that some of the recorded asymmetries in their studies could be due to the apparition of a lameness on the circle that was not visible on the straight line.

Studies agree that forelimb lameness induces a reduced downward movement of the head (AI-min) during the stance phase of the lame limb (Hammarberg et al., 2016; Pfau et al., 2016; Rhodin et al., 2013, 2017), particularly for the inside lame limb when trotting on a circle (Pfau et al., 2016; Pfau, et al., 2022; Rhodin et al., 2013). The importance of the head movements for detecting the inside lameness and the withers for the outside lameness, as observed here, has been mentioned in the detailed results of a linear discriminant analysis discriminating positive and negative anesthesia realized by Pfau et al. (2022). They revealed that the minimum and upward movement asymmetry of the withers were the features with the most important weight to discriminate the anesthesia effect on the outside limb in circles on a hard surface, respectively, in each canonical discriminate function. Also, the minimum altitude of the head had the most important weight for the inside limb in the first canonical discriminate function. Marunova et al. (2022), without the separation of outcomes from the inside and the outside limbs, measured significant differences in the head asymmetry indices and an upward withers asymmetry index before and after positive anesthesia.

No thresholds were previously determined for the locomotion on circles, allowing only comparisons with straight lines. For discriminating sound horses from lame horses with the lame limb on the inside of the circle, thresholds of head amplitude asymmetry (AI-up_H) showed higher values (-49% and +49% for respectively LF and RF lame limb) than thresholds for discriminating sound horses from lame horses established using similar methods on a straight line (-36% and +24% for respectively LF and RF lame limb) [15]. Conversely, thresholds of AI-up_H established for discriminating sound horses from lame horses with the lame limb on the outside of the circle showed lower values (+7% and 0% for respectively LF and RF lame limb) than thresholds for discriminating sound horses from lame horses on a straight line (-36 and +24% for respectively LF and RF lame limb) (Macaire et al., 2022). This difference underlines the absolute need to take into account the physiological asymmetry induced by the circle on the head movements. In contrast, thresholds of withers amplitude asymmetry

(AI-up_W) were less influenced by movement on the circle when the lame limb was on the outside (-5% and +13%, for respectively LF and RF lame limb, on the circle compared to -10% and +7%, for respectively LF and RF lame limb, on a straight line) (Macaire et al., 2022).

The results obtained also demonstrate that, on the circle, the values of certain indices must be considered abnormal when they are equal to 0% (perfect symmetry between right and left). For example, when the index of the minimum withers height (AI-min_W) is equal to zero on a circle, this result indicates lameness on the limb outside the circle. An analysis of the symmetry indices on the circle must therefore take account of this shift in relation to what is expected on the straight line. This information is also useful for the clinician, who should consider that perfect symmetry on the circle could be interpreted as suspicious, as physiological asymmetry is to be expected.

In our study population, it appeared that the average grades attributed by the veterinary specialist to the inside forelimb lameness were slightly higher than the grade attributed to outside forelimb lameness. Means of lameness grade were indeed 3.5/10 for the inside forelimb and 3.1/10 for the outside forelimb. One hypothesis could be that injuries affecting the included horses were more painful for the inside limb than for the outside limb (Denoix, 2021). This could be a result of greater collateromotion and axial rotation movements in the inside limb than in the outside limb (Denoix, 2021). But, it should first and foremost be remembered that the main manifestation of an inside lameness is on the head, leading to a possible overestimation of lameness with an obvious head nod compared to a withers asymmetry (Starke & May, 2022a).

In the present study, AIs were divided by the ROM to obtain relative indices expressed as a percentage. ROM values in centimeters are also provided in Table S2 for the locomotion on the right rein and in Table S3 for the locomotion on the left rein, meaning that the absolute value differences between the right and left limbs in centimeters can be easily recalculated using the formula $AI(\%) \times ROM(\text{cm}) / 100$. However, normalizing values seems sensible in order to compare movements measured in a heterogeneous population, including individuals of different sizes (from pony to large horse) with varying vertical amplitudes of gaits. In addition, IMU systems differ in how they process accelerometric signals into displacement and this affects the threshold values that are

used across systems (Pfau et al., 2016). Normalization can facilitate the comparison of asymmetry indices processed by different gait analysis systems, as suggested by Hardeman et al. (2021).

In this study, an index based on temporal pattern asymmetry was used. AI-Tmax, reflecting a difference in duration of the down–up cycle between the right and left stance, showed a discriminative power as high as the amplitude asymmetry of the head and the withers. The results showed a reduction in the duration of the down–up cycle (time between two maxima) during the stance phase of the lame limb. Asymmetry indices based on Fourier transform have been shown to be indicators of lameness lameness (Audigié et al., 2002; Keegan et al., 2003; Kramer et al., 2004). Also, Pfau et al. (2018) found that the relative timing of the head movements compared to the withers or the pelvis was also an indicator of lameness. This underlines the importance of these temporal variables in the identification and analysis of lameness.

Horses were included in this study if they were lame on both reins. This selection criterion represents a unique subgroup of lameness cases, showing a specific manifestation. This choice has been made in order to guarantee unambiguous lameness under circle conditions, and in order to study the locomotion of the same horses whether they turn on the right rein or on the left rein. Otherwise, the locomotion of lame horses on the right rein would not be the locomotion of the lame horses, which were studied on the left rein. On the contrary, the group of sound horses would remain unchanged between the two reins, even though they are the reference group for comparison.

A well-known limitation of this study is the clinical reference used to distinguish lame horses from non-lame horses considering that visual clinical assessment is recognized by definition as being subjective (Keegan et al., 2010; Starke & Oosterlinck, 2019). This is a deliberate choice. Visual assessment is not considered here as a “gold standard” but only as a reference to what exists in the best possible conditions in order for clinicians to appropriate the tools for quantifying locomotor asymmetries compared to what they are used to seeing and concluding subjectively with the classical (even imperfect) methods. This is a key issue for “calibrating” these new quantitative tools and ensuring that the slightest asymmetry recorded by the machine is not wrongly

considered to be an expression of lame-ness, particularly in the circle. However, in order to minimize the limits of subjective examination, the veterinarians chosen in this study were highly experienced and trained in the same clinic. These factors have been shown to improve agreement between vets (Hammarberg et al., 2016; Pfau et al., 2018). Confounding specialists and unexperienced vets, a 69% agreement between veterinarians was reached on forelimb lameness detection on circles (Hammarberg et al., 2016). Moreover, the lowest grade of lameness (1/10) was excluded because of weaker agreement for very subtle asymmetries (Keegan et al., 2010), and sound horses were included based on the agreement of three veterinary specialists in order to decrease uncertainty (Starke & May, 2022a). The strict selection criterion resulted in a sample that only represents a proportion of lame-ness cases. This choice was made in order to study unambiguous and simple lameness cases as a first step.

This study aims to investigate spontaneous cases of lameness of various origins. However, it is obvious that lameness can have different clinical expression depending on the type of injury (Denoix, 2021; Ross & Dyson, 2011). Circles may further reveal lameness unseen on the straight line line (Chateau et al., 2013; Dyson, 2011; Scoggin & Ross, 2021). Some indices may be modified according to the type of injury. More horses with specific types of injuries should be included to go further in this direction.

Other limitations induced by circles were the radius, speed and body lean angle. The diameter of the circle was imposed with a standardized examination area. However, these factors are difficult to control precisely in practice. Yet, they have been shown to affect the symmetry (Pfau et al., 2012, 2021), although the relationship between asymmetry and body lean angle has been considered unpredictable (Greve & Dyson, 2016).

6.5 Conclusions

This study established preliminary thresholds for the clinical interpretation of asymmetry indices when the horses lunged at trot on short circles under clinical examination conditions for simple limb lameness shown on both reins with a grade over 1/10. For discriminating sound horses from lame horses with the lame forelimb

on the inside of the circle, the asymmetry thresholds were approximately (average between right and left absolute values) 24% and 49% for, respectively, the minimum and the amplitude of the elevation of the head, and 12% for the temporal phase shift of the head. For discriminating sound horses from lame horses with the lame forelimb on the outside of the circle, the asymmetry thresholds were approximately (average between right and left absolute values) 10% and 9% for, respectively, the minimum and amplitude of elevation of the withers, and 2.5% for the temporal phase shift of the withers.

The results confirmed that circles on a hard surface induce the asymmetry of movements in sound horses. This asymmetry should not be confused with lameness, making the notion of threshold particularly important in this circumstance of the locomotion. In this study, asymmetry of the head movements was shown to be more effective to discriminate forelimb lameness when the lame limb was on the inside of the circle (sensitivity $\geq 69\%$ and specificity $\geq 81\%$), whereas asymmetry of the withers movements was shown to be more effective to discriminate lameness when the lame limb was on the outside of the circle (sensitivity $\geq 72\%$ and specificity $\geq 77\%$). The temporal asymmetry between the left and right duration of the vertical displacement cycle of the head or of the withers showed a discriminative power as high as asymmetry indices calculated from the amplitude of the vertical displacements. These quantitative results are useful in objectively helping clinicians to establish an informed diagnosis. In the future, these thresholds will be refined by including more horses and will be specific to the anatomical location and to the type of lesion responsible for the lameness. Indeed, this study needs to be extended by adding horses with different lameness types and horses that show lameness on only one rein. Also, horses with subtle lameness (1/10 grade) have not been included here, considering that the level of agreement between clinicians for very subtle asymmetries is low (Keegan et al., 2010). However, further studies will be needed to refine thresholds for those more subtle and uncertain cases. In addition, the investigation should be extended to the detection of hindlimb lameness and to circles on a soft surface.

6.6 Points à retenir

Ce chapitre montre que les indices de la tête, excepté l'AI-max, sont les plus pertinents pour discriminer les boiteries antérieures lorsque le membre boiteux est à l'intérieur du cercle. A l'inverse, ce sont les indices du garrot, excepté l'AI-max, qui discriminent le mieux les boiteries antérieures lorsque le membre boiteux est à l'extérieur du cercle. L'AI-up de la tête discrimine aussi les boiteries antérieures du membre externe au cercle. L'asymétrie temporelle (AI-Tmax) a révélé un pouvoir de discrimination des boiteries équivalent à l'asymétrie d'amplitude. Ces indices montrent une somme sensibilité + spécificité supérieure à 150%, mais aucun ne montre de pouvoir discriminant nettement plus prononcé qu'un autre.

Les seuils de détection d'une boiterie interne sont fortement asymétriques (de 10 à 49% de réduction du mouvement pour le membre interne), tandis que ceux des boiteries externes sont plus centrés (13% d'asymétrie maximum). L'interprétation des valeurs d'asymétrie sur le cercle est donc à séparer de l'interprétation des valeurs en ligne droite.

Ce dernier chapitre apporte une aide préliminaire à l'interprétation des valeurs d'asymétrie mesurées sur le cercle, partie importante de l'examen locomoteur dynamique dans la détection des boiteries.

6.7 Etude complémentaire

L'étude de la discrimination de l'asymétrie du pelvis de chevaux présentant visuellement une boiterie postérieure et de chevaux sains sur les cercles sur sol dur a fait l'objet d'une présentation orale et d'un poster présentés à l'International Conference on Equine Exercise Physiology (ICEEP) en 2022. De même, des seuils préliminaires ont été établis et leur sensibilité et spécificité à détecter la boiterie postérieure en cercle ont été renseignés. Le poster est en Annexe 5 : Exploration of asymmetry thresholds to characterise hindlimb lameness on the circle. Macaire, C.; Hanne-Poujade, S.; Denoix, J.-M.; Coudry, V.; Jacquet, S.; Bertoni, L.; Tallaj, A.; De Azevedo, E.; Audigié, F.; Martin, P.; Frédéric Marin, F.; Chateau, H. ICEEP 2022.

Les chevaux considérés comme boiteux uniquement d'un membre postérieur et d'un grade supérieur à 1/10 à une main lors de la locomotion en cercle sur sol dur étaient inclus. La Figure 40 résume les effectifs des chevaux inclus dans chaque groupe.

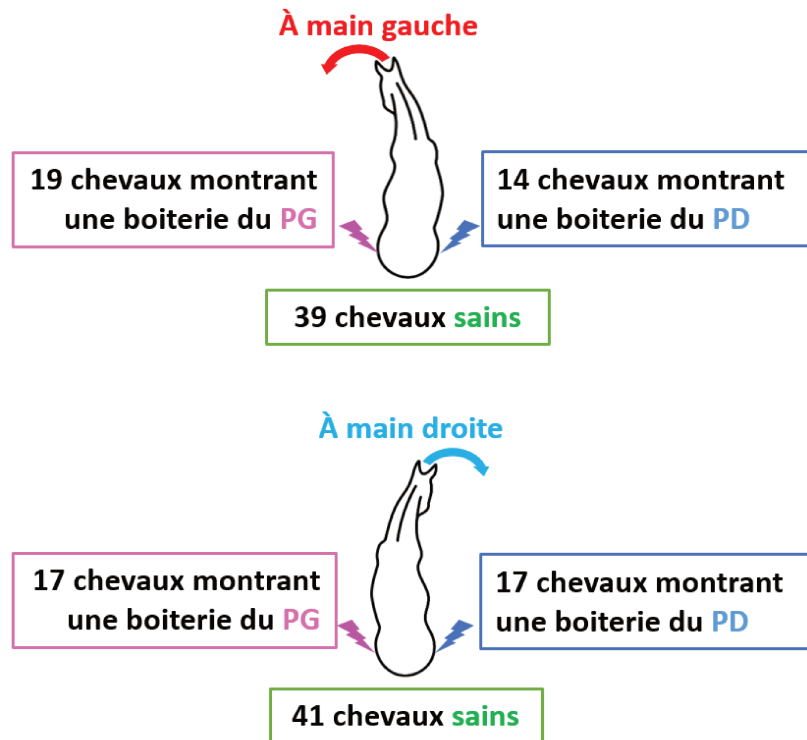


Figure 40 Effectif des chevaux inclus à partir de l'évaluation visuelle de leur locomotion sur chaque main séparément en cercle sur sol dur par un clinicien spécialiste en locomotion équine au cours d'un examen locomoteur.

Les résultats principaux de cette étude montrent une réduction du minimum (min), de l'amplitude d'élévation (up) et de l'amplitude de chute (down) du déplacement dorso-ventral du pelvis lors de l'appui du postérieur interne au cercle chez les chevaux sains. Pour les indices AI-min et AI-up, ce phénomène est exacerbé lorsque le postérieur interne au cercle est visuellement boiteux. L'asymétrie physiologique est diminuée (symétrisée) voire inversée (réduction des mouvements pour l'appui du postérieur externe) lorsque le postérieur externe au cercle est visuellement boiteux. Les maxima sont quant à eux physiologiquement peu asymétriques entre le postérieur droit et gauche chez les chevaux sains trotant en cercle. Le maximum atteint après la propulsion du postérieur visuellement boiteux montre une diminution aux deux mains.

Parmi les indices étudiés (AI-min, AI-max, AI-up et AI-down), les indices AI-max et AI-up du pelvis ont montré une meilleure sensibilité (>82%) et spécificité (>67%) à discriminer les boiteries postérieures en cercle. La spécificité est cependant supérieure pour la discrimination des boiteries postérieures externes (83% et 92%) comparée à la discrimination des boiteries postérieures internes au cercle (67% et 73%). Les seuils associés à ces capacités de discrimination sont représentés dans la Figure 41.

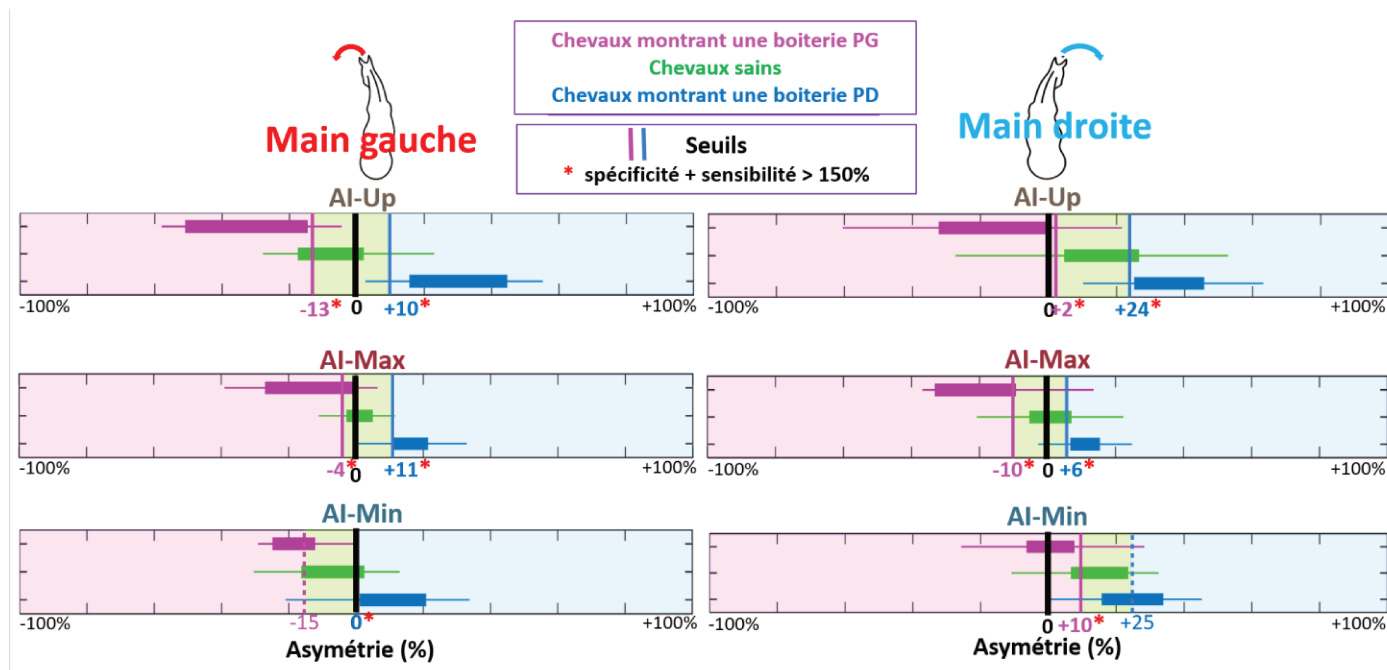


Figure 41 Seuils d'asymétrie associés aux meilleures capacités de discrimination des chevaux sains et des chevaux présentant visuellement une boiterie postérieure droite (PD) ou gauche (PG) en cercle à main droite ou à main gauche. Les boxplots des valeurs d'asymétrie mesurées sont représentés pour le groupe de chevaux sains (vert), le groupe de chevaux boitant du PD (bleu) et le groupe de chevaux boitant du PG (rose). Les seuils associés à une sensibilité et spécificité dont la somme est supérieure à 150% sont indiqués par une étoile rouge.



CHAPITRE 7

DISCUSSION

7.1 Résumé des résultats

Au cours de cette thèse, un outil de quantification de boiterie chez le cheval a été intégralement développé et testé pour objectiver la reproductibilité des mesures et leur signification clinique.

La répétabilité des mesures intra-individus a été mesurée et la reproductibilité de l'utilisation de l'outil avec différents opérateurs a été testée et ont mis en avant les intérêts et limites de la mesure.

L'asymétrie mesurée dans les conditions de terrain sur un échantillon de référence de chevaux, ne présentant pas d'anomalie locomotrice, ont été décrites.

Enfin ce travail a établi des seuils permettant l'interprétation des valeurs d'asymétrie pour la détection des boiteries et l'identification du membre concerné, dans les conditions d'un examen locomoteur, en ligne droite et en cercles. La sensibilité et la spécificité de chaque indice d'asymétrie, calculées par rapport à l'évaluation visuelle d'un vétérinaire spécialiste ont été évaluées. Elles ont permis de sélectionner les indices d'asymétrie les plus pertinents. Les effets les plus significatifs sur les indices les plus pertinents peuvent être résumés de la façon suivante :

- Les déplacements dorso-ventraux de la tête et du garrot montrent une réduction de l'amplitude de mouvement et une plus faible descente sur l'antérieur visuellement boiteux en ligne droite.
- Le déplacement dorso-ventral de la croupe montre une réduction de l'amplitude d'élévation et monte moins haut sur le postérieur visuellement boiteux en ligne droite. Une réduction similaire est aussi présente lors de boiterie évaluée visuellement en cercle. Il est important de souligner que cette dernière modification est conclue en comparaison à l'asymétrie physiologique induite par le cercle, contrairement à la ligne droite.
- En cercle, le déplacement dorso-ventral de la tête montre une réduction de l'amplitude, une plus faible descente et une réduction de la durée de la demi-foulée lorsque l'antérieur visuellement boiteux est à l'intérieur du cercle. Lorsque l'antérieur visuellement boiteux est à l'extérieur du cercle, c'est cette

fois—ci le déplacement dorso-ventral du garrot qui montre une réduction de l'amplitude, une plus faible descente et une réduction de la durée de la demi-foulée.

Les seuils associés à la meilleure sensibilité et spécificité calculés grâce à ce travail ont été implémentés dans l'outil EQUISYM®.

7.2 Comparaison avec la littérature et explication clinique des résultats

Ces résultats apportent des éléments de réponse scientifiques sur une utilisation des outils de quantification des boiteries, sur la répétabilité des mesures et sur l'aide apportée par les indices d'asymétrie sur la détection de la boiterie et l'identification du membre en comparaison à l'évaluation visuelle de spécialistes en locomotion.

7.2.1 La reproductibilité des systèmes de quantification des boiteries

Le résultat principal issu de la première étude menée au cours de ce travail est que l'utilisateur aurait peu d'impact sur la prise de mesure. D'autres études avaient étudié la reproductibilité de systèmes de quantification d'asymétrie selon un placement des marqueurs ou capteurs (Moorman *et al.*, 2017 ; Serra Bragança *et al.*, 2018). Elles concluent sur l'importance du placement à 2 ou 3 cm près. Ici l'objectif était de reproduire les conditions potentiellement rencontrées sur le terrain avec le placement réel opéré par des personnes plus ou moins expérimentées. Au vu de la différence des conclusions, le remplacement selon les personnes ne différencierait pas autant que les remplacements simulés par les précédentes études. Le développement d'attaches adaptables et faciles à installer, a probablement contribué à ce résultat. La variation des mesures soustraite de la part due aux facteurs identifiables, comme l'utilisateur, l'ordre de répétition et la locomotion interindividuelle, a été exposée dans les résultats de cette thèse. Elle est substantielle et peut s'expliquer par une variation dans la locomotion du cheval en lui-même, par la variation dans la manière dont le meneur a tenu le cheval, par les événements environnants, et par d'autres facteurs non identifiés. Une variation intra-individu notable a été reportée pour d'autres indices d'asymétrie (Hardeman *et al.*, 2020; Kaido *et al.*, 2016; Keegan *et al.*, 2011). La variation liée aux événements environnants est supposée être réduite lors de mesures avec un système optique qui impose un lieu intérieur.

7.2.2 L'asymétrie physiologique impactée par une variabilité biologique

Ce travail de recherche a montré dans un second temps que dans une population de chevaux évalués visuellement sains par leur cavalier et des vétérinaires spécialistes, l'asymétrie est variable, particulièrement l'asymétrie de la tête. Ces résultats sont en accord avec les précédentes études qui mesurent l'asymétrie de chevaux considérés sains selon différents critères (citées dans le Chapitre 1.4.2). Les mouvements de la tête sont influencés par de nombreux autres facteurs en dehors de la locomotion. Il n'est donc pas surprenant que ses mouvements soient moins répétables et plus irréguliers. Keegan et al. (2001) ont particulièrement abordé cette limite à la répétabilité de la mesure.

Dans notre étude, une légère réduction des mouvements de la tête et de la croupe sur le diagonal gauche a été mesurée sur les chevaux sains. Ceci pourrait venir du meneur se tenant à gauche de la tête du cheval. Dans les conditions de terrain, le meneur doit contrôler la vitesse du cheval en exerçant des actions sur la longe. Pour nuancer cette hypothèse, une étude portant sur la tenue du cheval à sa droite ou à sa gauche ne révèle pas d'effet sur l'asymétrie (Hopkins & Pfau, 2014). Cette légère dysmétrie n'avait jamais été reportée jusqu'à présent. Or certaines études mesurant l'asymétrie chez des chevaux sains présentent des protocoles de sélection standardisés qui ont pour but de limiter l'effet de la longe. En effet, les critères d'une vitesse stable et d'un bon comportement (Hardeman et al., 2019; Kallerud et al., 2021; Persson-Sjodin et al., 2019), voire le critère de ne pas interférer avec la tête (Scheidegger et al., 2022) sont cités dans ces études.

7.2.3 Le mouvement du garrot est un indicateur de boiterie

Sur la ligne droite, l'indice d'asymétrie ayant le plus grand pouvoir de discrimination des boiteries antérieures est l'amplitude d'élévation dorso-ventrale du garrot. Ce résultat est original, car les mouvements de la tête se sont montrés plus sensibles que ceux du garrot pour révéler les boiteries antérieures dans de nombreuses études (Buchner et al., 1996a; Marunova et al., 2022; Pfau et al., 2020). La descente du garrot, en lien avec une extension métacarpo-phalangienne (descente du boulet) plus marquée semble pourtant un élément clé dans l'évaluation visuelle. Certaines études évaluent la locomotion du cheval par l'arrière et l'avant, ce qui empêche la vision du

garrot (Bragança et al., 2020; Lawin et al., 2023; Starke et al., 2021; Starke & May, 2022a; Starke & Oosterlinck, 2019). Les résultats de notre étude soutiennent l'importance de l'évaluation de la mobilité du garrot (et de la descente du boulet), et concluent qu'une évaluation de la locomotion par une vision latérale apporte des informations complémentaires pour l'analyse des boiteries antérieures.

Au sujet des résultats du Chapitre 6.3, il est original qu'une boiterie de l'antérieur interne au cercle s'exprime sur la tête, tandis que la boiterie de l'antérieur externe s'exprime sur le garrot. Ils sont pourtant en accord avec ceux affichés par Pfau et al. (2022). Les hypothèses suivantes permettraient d'expliquer ce résultat : Lors d'une boiterie antérieure interne, la tête accentuerait simplement le mouvement déjà induit par le cercle décrit chez les chevaux sains (Starke et al., 2012). Pour les boiteries externes, le cheval devrait compenser en réalisant des mouvements de tête contraires aux mouvements physiologiques exprimés sur le cercle. L'asymétrie physiologique induite par le cercle sur le garrot étant moins prononcée que celle induite sur la tête, les mouvements liés à la boiterie externe s'exprimeraient alors plutôt sur le garrot.

7.2.4 Les indices d'asymétrie indicateurs de boiterie

L'asymétrie des minima (AI-min) est plus discriminante pour les boiteries antérieures sur notre échantillon, tandis que l'asymétrie des maxima (AI-max) est plus discriminante pour les boiteries postérieures. Selon le lien entre la GRF et les indices d'asymétrie étudié par Bell et al. (2016), l'asymétrie des minima et des maxima permettent de caractériser les boiteries en 2 types : respectivement « d'appui » et « de propulsion ». L'asymétrie des minima étant plus discriminante pour les boiteries antérieures dans notre échantillon, nous pouvons supposer que les lésions douloureuses lors de la mise en charge étaient majoritaires pour les antérieurs. A l'inverse, l'asymétrie des maxima était plus discriminante pour les boiteries postérieures, ce qui laisse supposer que les lésions affectant la propulsion étaient majoritaires pour les postérieurs. Ce résultat semble cohérent avec la fonction des antérieurs portant la majorité du poids (Weishaupt, 2004) et celle des postérieurs servant à la propulsion (Denoix, 2021). Ce résultat souligne l'importance d'établir des seuils pour les indices concernant les minima séparément de ceux concernant les maxima, contrairement à ce qui est appliqué dans la littérature (cf. Chapitre 1.4.3). De

plus, les sensibilités et spécificités calculées ici sont donc dépendantes du nombre de lésions impactant l'indice en question. Selon cette hypothèse, augmenter la spécificité plutôt que la sensibilité serait une option pour améliorer les seuils des indices d'asymétries comme le minimum de la croupe ou le maximum du garrot et de la tête.

Parmi les indices d'asymétrie testés, l'Amplitude d'élévation (AI-up) semble être l'indice le plus discriminant des boiteries, quelle que soit la partie anatomique étudiée. Les différences de minima et de maxima sont mathématiquement cumulées dans l'asymétrie de l'amplitude totale, faisant de l'Amplitude d'élévation (AI-up) un indice plus « générique ».

Les seuils, exprimés ici en pourcentage, sont difficiles à comparer à la littérature où ils sont exprimés en millimètres. Les résultats indiquent cependant une légère différence de seuil d'asymétrie entre les boiteries droites et les boiteries gauches. Appelée latéralité, elle a été précédemment reportée dans la littérature (Byström et al., 2020). Ces résultats mettent donc aussi en avant un besoin d'établir des seuils séparément pour les boiteries droite et gauche, et non de regrouper leurs valeurs absolues (Pfau et al., 2020). De même, les valeurs des seuils ne sont pas strictement en « miroir » sur les cercles à main droite et à main gauche, contrairement à l'hypothèse émise par Pfau et al. (2021).

L'indice d'asymétrie de la durée séparant deux maxima du déplacement dorso-ventral s'est révélé aussi pertinent que les indices d'asymétrie d'amplitude. Ce résultat ouvre une nouvelle voie d'indicateurs de boiterie et met en avant l'importance de la temporalité. Ces résultats soutiennent l'importance de l'indice de déphasage temporel Phi dans la détection de la boiterie (Audigié et al., 2002; Roepstorff et al., 2022). Phi est un indice issu d'une méthode mathématique incluant la transformée de Fourier appliquée aux courbes de déplacement dorso-ventral et traduit la part temporelle de l'asymétrie (cf. Chapitre 1.4.1).

7.3 Intérêts et limites des matériels et méthodes

7.3.1 L'évaluation de la boiterie

La principale limitation de l'étude repose dans la difficulté à établir de façon certaine la présence ou non d'une boiterie. En effet, selon les définitions citées dans le Chapitre 1.2.2, seul un vétérinaire peut juger de la présence d'une boiterie. Cependant la variation inter-observateur remet en question cette référence (cf. Chapitre 1.2.3).

D'autres méthodes permettant d'évaluer la boiterie existent. La mesure de la GRF sous les pieds du cheval a certes été considérée comme une référence pour l'évaluation de la boiterie, bien qu'elle ait été remise en cause (Donnell et al., 2015), mais elle ne permet pas d'enregistrer de nombreux chevaux en conditions cliniques. L'induction de la boiterie a été une méthode fiable, mais elle ne représente pas les boiteries affectant naturellement les chevaux.

Les résultats des études concernant la variation inter-observateurs ont permis de mettre en place un protocole réduisant cette subjectivité. L'évaluation par des spécialistes en locomotion est considérée dans la communauté vétérinaire comme une référence. L'expérience et le nombre de cas récemment vus augmentent la fiabilité (Arkell et al., 2006; Hammarberg et al., 2016; Starke et al., 2021; Starke & May, 2017; Starke & Oosterlinck, 2019). Les vétérinaires évaluateurs dans cette étude sont au moins diplômés DESV (spécialiste en pathologie locomotrice équine) et certifiés ISELP (International Society of Equine Locomotor Pathology) et travaillent à temps plein au CIRALE.

Les données étaient recueillies à partir des comptes rendus de consultation, rédigés à partir des notes prises au cours de l'examen locomoteur complet et après le diagnostic des lésions.

L'étude n'inclut pas de chevaux présentant visuellement une boiterie de grade 1/10, car la subjectivité est particulièrement haute lors de boiterie subtile (Hammarberg et al., 2016; Keegan et al., 2010; Starke et al., 2021; Starke & Oosterlinck, 2019). L'étude de leur classification par rapport aux seuils viendra dans un second temps. En effet une utilité des seuils sur le terrain sera particulièrement une aide à la décision dans les cas de boiteries de faible grade.

Les évaluateurs ont été formés à voir les boiteries avec les mêmes points anatomiques d'intérêt et la même méthode. La variation de leur évaluation devrait en être réduite, mais cela peut constituer un biais.

Enfin la sélection des chevaux sains comprenait l'avis du cavalier sur la locomotion de sa monture au travail et l'avis d'un vétérinaire spécialiste sur l'ensemble d'un examen locomoteur. Pour le Chapitre 6.2, l'avis vétérinaire a été renforcé par une visualisation sur vidéos et à l'aveugle, l'appréciation étant d'autant plus subtile sur le cercle. Ainsi, trois évaluations de vétérinaires spécialistes devaient conclure indépendamment à un cheval sain lors de la visualisation en aveugle de vidéos de sa locomotion en ligne droite et en cercles.

7.3.2 Collecte des données

L'objectif du protocole de collecte des données était de représenter les conditions réelles d'utilisation du système. Ainsi les données ont été collectées au cours des consultations ayant lieu au CIRALE, sans présélection des cas. Les lieux étaient standardisés. Trois lignes droites ont été utilisés : 2 extérieures revêtues de macadam de 30 mètres de long et 1 intérieure revêtue de caoutchouc de 25 mètres de long. Concernant la locomotion en cercle sur sol dur, deux espaces extérieurs de 10 et 15 mètres de diamètre étaient revêtus de pavés autobloquants, et un intérieur de 8 mètres de diamètre était revêtu de caoutchouc. Les tailles de ces cercles sont susceptibles de varier et peuvent impacter la locomotion (Pfau et al., 2012). La taille du cercle est en effet rarement standardisée sur le terrain. Même avec des repères sur la longe, le meneur n'est pas un point fixe et se déplace en fonction du diamètre qui convient au cheval. De même pour la vitesse, elle n'est pas maîtrisée par tous les propriétaires.

Les chevaux n'étaient volontairement pas échauffés pour se placer dans les conditions réelles de l'examen clinique. Dans certains protocoles d'évaluation de l'asymétrie, un temps d'échauffement était prévu pour limiter la variabilité des mesures (Hardeman et al., 2019; Pfau et al., 2022). Cet échauffement, rarement réalisé avant un examen locomoteur, pourrait biaiser le résultat de l'évaluation clinique.

De plus, le vétérinaire arrête de faire trotter le cheval dès qu'il a évalué ce qu'il voulait. Dans ces conditions, le nombre de foulées enregistrées en ligne droite est inférieur

(moyenne de 14,7 foulées dans l'étude 3) à celles enregistrées sur le cercle (moyenne de 20,4 foulées dans l'étude 4). En effet, obtenir une vitesse stable sur de nombreuses foulées consécutives en ligne droite est challengeant. Réduite à quelques foulées parfois, les valeurs incluses en ligne droite pourrait être moins représentatives de la locomotion globale des chevaux. La préconisation d'enregistrer 27 foulées de trot par Keegan et al. (2011) est une contrainte d'utilisation des outils de quantification de la boiterie, car celle-ci allonge le temps de l'examen locomoteur (Hardeman et al., 2021). Dans une étude non publiée au cours de cette thèse, aucune différence significative n'apparaît lors de la comparaison des moyennes obtenues avec 6 foulées et celles obtenues en prenant en compte plus de 6 foulées. Ici encore, il est essentiel que l'outil s'intègre aux protocoles usuels mis en place en clinique.

Le meneur était le propriétaire ou le cavalier du cheval. Il a probablement un effet sur la locomotion du cheval. La variation apportée par le meneur n'a pas été étudiée dans l'étude de reproductibilité en standardisant ce paramètre, et ne semble pas avoir été étudiée dans la littérature. La vitesse au trot en ligne droite dépend de la vitesse du meneur par exemple. Or la vitesse a un effet sur l'asymétrie (Parmentier et al., 2019) et sur l'évaluation visuelle (Starke et al., 2013). Ce paramètre devrait donc impacter dans une mesure similaire les résultats mesurés et les résultats évalués visuellement par les vétérinaires. D'autre part, la normalisation des indices permettrait de limiter l'effet de la vitesse.

Lors de la collecte des données, le système d'attache a été optimisé dans l'objectif de standardiser le placement des capteurs sur des points anatomiques précis, quelle que soit la morphologie du cheval. Le Chapitre 0 confirme cette optimisation en montrant que l'opérateur et son degré de connaissance du système n'ont pas d'influence sur la collecte des données. Seules les données issues du garrot continuent à montrer des artefacts sur de rares cas où la peau du garrot bouge beaucoup.

7.3.3 Traitement des données

Le traitement des données issues des IMUs nécessite des choix méthodologiques incluant une sélection des données valides et des options de calcul.

La sélection des foulées à traiter constitue la première étape incontournable où certains choix doivent être faits pour automatiser ce processus. Ainsi les périodes de trot inférieures à 3,5 secondes ont été exclues en supposant que le cheval n'avait pas le temps d'atteindre une vitesse stable sur une période aussi courte (avec des interruptions par exemple de foulées de pas ou de galop). Ce temps correspond à environ 3 foulées de trot consécutives. Ensuite, la première et la dernière foulée d'une succession de foulées de trot ont été systématiquement supprimées. Enfin, certaines foulées ont été exclues lorsqu'elles étaient considérées comme artéfactuelles. Le retrait des événements non représentatifs de la locomotion du cheval à un trot stable est basé sur une corrélation par rapport à la courbe moyenne des foulées. Cette méthode de retrait présente le risque d'éliminer quelques foulées d'une boiterie intermittente. Elle permet néanmoins de conserver 96% des foulées enregistrées. Ce point de traitement des données sera approfondi par Mahaut Gérard au cours de sa thèse CIFRE (LIM France – ENVA – TELUQ), débutant en septembre 2023.

L'étape d'intégration du signal accélérométrique pour obtenir un déplacement est une source de différences entre les différents systèmes de quantification de l'asymétrie. Une méthode corrigeant en amont la verticalité du capteur est utilisée dans EquiMoves® (Bosch et al., 2018) et dans les IMUs MTx® (Xbus system) (Pfau et al., 2005). Cette correction requiert une calibration lorsque le cheval est à l'arrêt et fait l'hypothèse que la verticale reste proche de cette situation pendant la locomotion. Cependant lorsque le cheval tourne et se penche vers l'intérieur du cercle, l'hypothèse devient grossière et cette correction ne peut pas être appliquée. EQUISYM®, comme l'Equinosis Q® avec le logiciel Lameness Locator, utilise l'axe dorso-ventral du capteur positionné sur le cheval. Cette étape engendre des différences dans les mesures d'asymétrie en millimètres (Pfau et al., 2016). L'adaptation des valeurs des seuils est alors nécessaire d'un outil à l'autre. Aucune étude de comparaison de mesures entre EQUISYM® et un autre système n'existe mais serait intéressante pour inscrire plus facilement ces résultats dans l'utilisation actuelle des autres outils.

De plus, les filtres utilisés pour corriger les dérives sont différents selon les systèmes (Keegan *et al.*, 2001 ; Bosch *et al.*, 2018 ; Serra Bragança *et al.*, 2020). Les différences entre ces filtres semblent cependant mineures pour mesurer l'asymétrie (Serra Bragança *et al.*, 2020).

7.3.4 Calcul des indices d'asymétrie

Les indices d'asymétrie étudiés dans ce travail sont exprimés en pourcentage. Ils sont relatifs à l'amplitude maximale du mouvement dorso-ventral de chaque foulée. Ce choix a été fait pour que la mesure soit relative et proportionnelle pour chaque cheval. Il semble évident que la taille et l'amplitude locomotrice soient extrêmement variables d'une race à une autre et d'un individu à l'autre. Les indices d'asymétrie seraient alors moins influencés par la vitesse et par la taille du cheval, dont les impacts sur les mesures cinématiques ont été montrés (Galisteo et al., 1998). Ce choix permettrait également une meilleure standardisation des indices d'asymétrie obtenus avec les différentes méthodes de traitement de signal, une problématique abordée ci-dessus. C'est pourquoi chaque article a été accompagné des valeurs de l'amplitude maximale, permettant la normalisation de l'indice, pour chaque cheval. Ainsi l'équivalence peut être réalisée plus facilement entre systèmes. De plus, ils amélioreraient la discrimination des chevaux présentant des lésions majeures avec des chevaux présentant des lésions mineures (Hardeman et al., 2021). L'inconvénient à ce jour est la comparaison avec les précédents travaux. En plus des indices relatifs en pourcentage, l'application EQUISYM® fournit aussi la valeur non relative de l'amplitude en centimètres, équivalente aux « diffmin » et « diffmax » utilisés dans la littérature (Figure 42). En effet une amplitude réduite pourrait indiquer une boiterie bilatérale (Ross & Dyson, 2011).

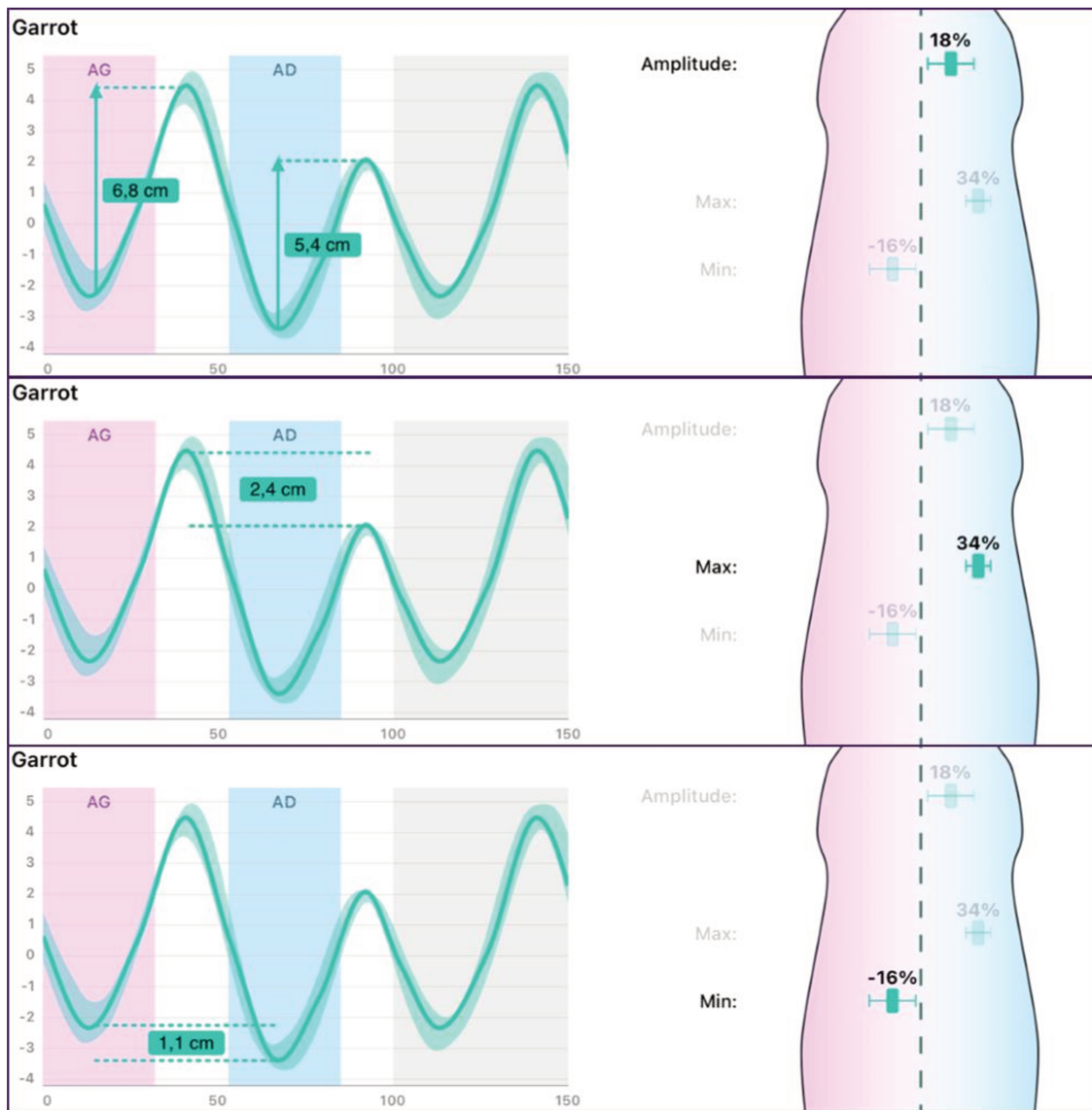


Figure 42 Visualisation dans l'application EQUISYM® des valeurs absolues et des valeurs relatives des indices d'asymétrie pour le déplacement dorso-ventral du garrot d'un cheval

La tête et ses mouvements aléatoires compliquent le calcul d'un indice répétable (Keegan et al., 2001). De plus, des boiteries sévères induisent des courbes s'éloignant fortement de la courbe sinusoïdale initiale (Figure 43). Il est alors difficile d'identifier le minimum et le maximum lors de l'appui sur le pied douloureux. Dans ce cas les indices d'asymétrie de la tête de cette foulée sont fixés à une valeur absolue de 100% (-100% lors d'une boiterie forte de l'antérieur gauche et +100% pour l'antérieur droit). Ce choix est arbitraire et le cas n'a été évoqué dans aucune publication précédente.

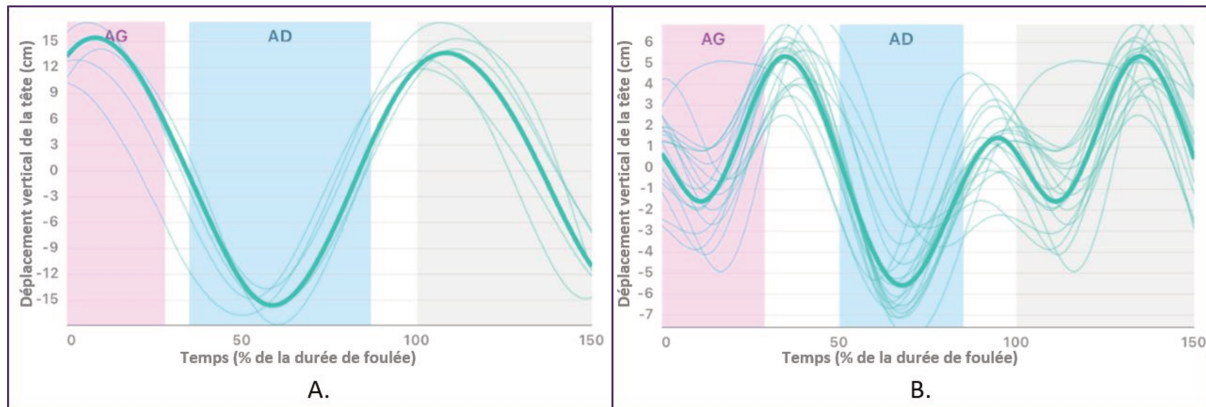


Figure 43 Courbes de déplacement dorso-ventral de la tête d'un cheval trottant à main droite et présentant une boiterie antérieure gauche (AG) de grade 3/5 selon le clinicien (A.). Et courbes mesurées après anesthésie diagnostique sur l'AG (B.). On peut noter la réapparition de la double sinusoïde après l'anesthésie locale.

7.4 Variabilité de l'asymétrie

7.4.1 Variabilité de l'asymétrie physiologique

La définition du cheval « sain » a été l'un des sujets de discussion principal de ces études. En effet, comme abordé au Chapitre 1.4.2, les performances du cheval au travail, l'avis visuel de la locomotion par des vétérinaires et les lésions diagnostiquées sont des indicateurs de la santé locomotrice du cheval. Cependant ces 3 aspects ne coïncident pas toujours (Barrey & Desbrosse, 1996; Dyson, 2000, 2013; Hoogmoed et al., 2003; Scheidegger et al., 2022). L'objectif de l'étude n'incluant pas l'aspect lésionnel, seuls les avis du cavalier et du vétérinaire ont été gardés pour définir un cheval sain. L'étude des lésions et leur incidence en fonction de leur localisation et de leur nature sur la cinématique constitue la prochaine étape des travaux de recherche.

Malgré les critères stricts pour définir un cheval comme cliniquement sain, aucun cheval sain de notre étude ne présentait des indices d'asymétrie parfaitement égaux à zéro. Ces résultats alimentent un sujet d'actualité. L'asymétrie mesurée chez des chevaux jeunes et au travail ou non modifiée sous anti-inflammatoires a en effet été étudiée dans des travaux antérieurs en biomécanique équine (Hardeman, 2021; Kallerud, 2021; Persson-Sjodin, 2020). Ces asymétries pourraient s'expliquer par des facteurs comme la vitesse, l'excitation, le manque de coordination, des mouvements de tête comportementaux, ou la manière de faire du meneur lors de la collecte des

données. Des facteurs de variabilité s'ajoutent lors de la locomotion sur le cercle : la vitesse ; le rayon ; l'angle du corps (ou en anglais « body lean angle ») ; l'incurvation ; et l'apprentissage à tourner. De plus, le travail modifie la locomotion du cheval (Biau, 2004; Greve & Dyson, 2016), et les chevaux sélectionnés pratiquaient différentes disciplines.

Une limite de nos études est le faible nombre de chevaux sains. Durcir les critères de sélection a d'ailleurs réduit le nombre de sujets sélectionnés. Dans le but d'agrandir ce nombre, des chevaux considérés sains par leur propriétaire ont été enregistrés par EQUISYM® et filmés au trot en ligne droite et en cercle dans leur centre équestre. Les vidéos ont été relues par les vétérinaires en aveugle dans l'objectif de sélectionner davantage de chevaux sains en dehors du contexte d'une clinique vétérinaire.

7.4.2 Variabilité de l'asymétrie pathologique

La population étudiée était celle rencontrée par les cliniciens dans leur pratique de tous les jours.

L'échantillon étudié a été constitué aléatoirement de boiteries « naturelles », et les chevaux inclus présentent des lésions diagnostiquées très diverses. Or comme discuté au paragraphe 7.2.4, le haut pouvoir de discrimination des boiteries antérieures par l'asymétrie des minima (AI-min) et celui des boiteries postérieures par l'asymétrie des maxima (AI-max) pourrait s'expliquer par le type des lésions présentes dans l'échantillon. Ainsi les résultats de notre étude mettent en avant une différence de manifestation clinique entre celle causée par des lésions affectant majoritairement les antérieurs et celle causée par des lésions affectant majoritairement les postérieurs. Cette hypothèse est à confirmer avec des études complémentaires.

Cependant, la population des chevaux qui viennent au CIRALE est différente de celle rencontrée par les vétérinaires de terrain. En effet, les chevaux sont principalement référés par leur vétérinaire soignant, pour une expertise clinique ou pour avoir accès à une imagerie diagnostique plus poussée. Ce qui implique que certaines boiteries peuvent présenter des signes atypiques ou peuvent être la manifestation de lésions rarement rencontrées. De plus, une boiterie d'un membre peut résulter de plusieurs lésions.

Bien que l'étude de la sévérité de la boiterie n'ait pas été l'objet des études présentées dans ce travail, l'inclusion d'une grande proportion de boiteries de faible grade (2/10) aurait ajouté de la précision dans l'établissement des seuils de détection de boiterie.

Par ailleurs, dans notre échantillon, une majorité de chevaux sont des Selle-Français et pratiquent du saut d'obstacle.

7.5 Application clinique de ce travail

Outre l'objectif scientifique, ce travail permet de fournir des conseils d'utilisation préliminaires pour l'interprétation des données fournies par le système EQUISYM® dans une utilisation clinique.

7.5.1 Sélection des indices pertinents à afficher

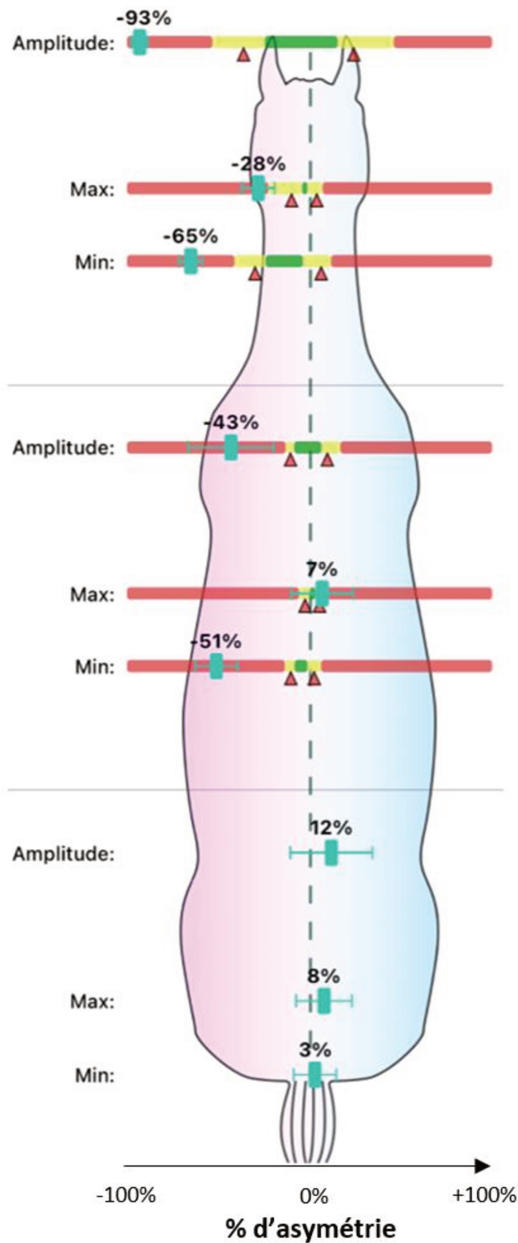
Ce travail est une première aide à la sélection d'indices à afficher aux vétérinaires. En effet, pour mettre l'interprétation à la portée d'un novice, les informations doivent être les plus pertinentes possibles. Par exemple, l'indice AI-down a été retiré des indices affichés dans l'application suite à son faible pouvoir de discrimination. De même, d'autres indices d'asymétrie provenant des signaux des capteurs des membres ont été analysés pendant la phase de traitement de données. Cependant leur capacité de discrimination des boiteries n'étant pas aussi forte que les indices calculés à partir du déplacement dorso-ventral du tronc, ils n'ont donc pas été sélectionnés pour être affichés. L'indice temporel AI-Tmax, testé ultérieurement, a révélé une capacité de discrimination aussi forte que les indices les plus discriminants. Il serait donc à inclure dans l'affichage des résultats des enregistrements lors d'une prochaine évolution de l'application EQUISYM®.

7.5.2 Utilisation des seuils

Les seuils calculés s'utilisent en les comparant aux valeurs mesurées. L'objectif de l'affichage est d'indiquer les valeurs des mesures et des seuils ensemble et de faciliter leur interprétation. La présentation des résultats a été réfléchi pour rendre lisible l'information utile. Ainsi des plages de couleurs apparaissent sur chaque indice pertinent. Les seuils s'affichent sur la tête et le garrot pour les boiteries antérieures, tandis qu'ils s'affichent sur la tête et la croupe pour les boiteries postérieures. Le jaune

représente la plage de valeurs comprises dans les intervalles de confiance à 95%, donc une zone d'incertitude. Un triangle rouge situé en dessous de cette plage jaune indique la valeur du meilleur seuil issu des analyses réalisées aux Chapitres 0 et 0. Le rouge représente la plage de valeurs supérieures à la borne haute de l'intervalle de confiance. Enfin le vert représente la plage de valeurs en deçà des bornes basses des intervalles de confiance. La Figure 44 montre l'affichage de ces seuils dans deux cas de boiteries, une antérieure et une postérieure. Les moyennes des indices d'asymétrie de ces chevaux se situent dans les plages de valeurs supérieures aux intervalles de confiance, dans la zone rouge. Ils permettent de conclure que les mesures de ces chevaux se rapprochent plus des valeurs mesurées dans le groupe de chevaux présentant respectivement une boiterie antérieure gauche et postérieure gauche qu'à celles du groupe de chevaux sains.

Exemple d'une boiterie antérieure gauche
Seuils antérieurs affichés



Exemple d'une boiterie postérieure gauche
Seuils postérieurs affichés

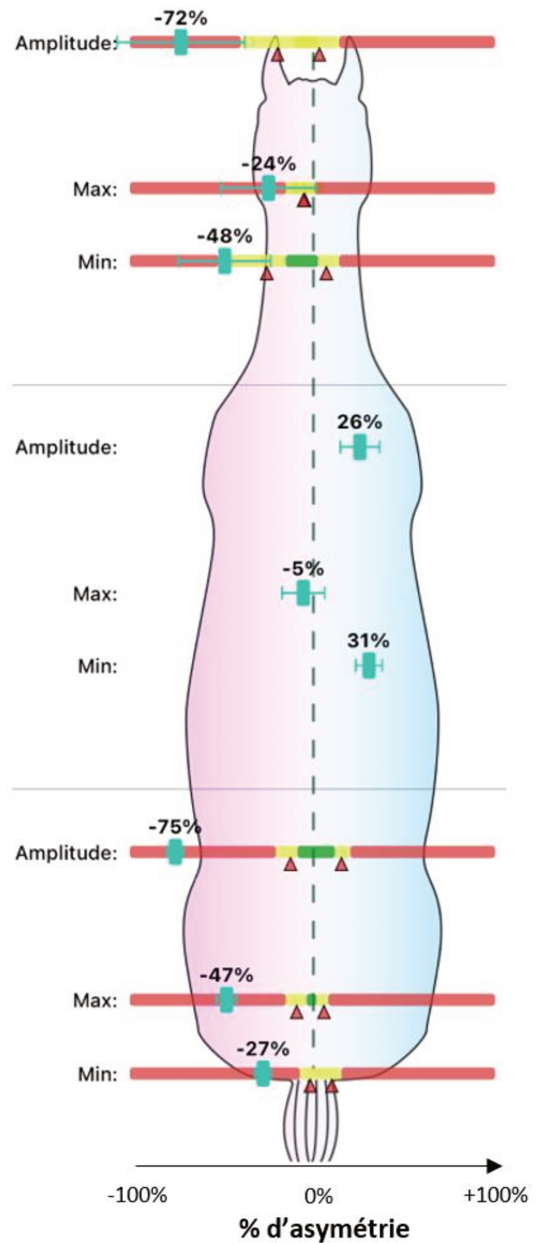


Figure 44 Exemple de résultats d'asymétrie en % de deux chevaux présentant respectivement une unique boiterie antérieure gauche (figure de gauche) et une unique boiterie postérieure gauche (figure de droite). Les moyennes et écarts-types de chaque indice sont représentés par les curseurs bleus. Les seuils de détection des boiteries sont représentés par des triangles rouges. Le triangle situé à gauche pour les boiteries des membres gauches et le triangle situé à droite pour les boiteries des membres droits. Ils sont chacun accompagnés d'une zone jaune représentant leur intervalle de confiance à 95% (IC) et d'une zone rouge représentant la plage de valeurs supérieures à la borne haute de l'IC. Une zone verte se situe entre les bornes basses des IC gauche et droit.

7.5.3 Situations d'utilisation des seuils

Ces seuils seront utiles dans plusieurs situations d'évaluation de la locomotion rencontrées en pratique vétérinaire. Par exemple, lors d'une boiterie subtile le vétérinaire peut avoir un doute sur sa présence. Son ressenti visuel peut être conforté par la comparaison de l'asymétrie mesurée sur le patient avec ces seuils. De même, une consultation d'expertise lors d'une visite d'achat peut être complétée par ces seuils. Ils pourraient être une aide à la détection d'anomalies à investiguer avec des examens complémentaires. Les seuils d'asymétrie sont d'autant plus importants à considérer sur les cercles puisqu'une asymétrie physiologique est présente dans cette circonstance de la locomotion. Il est par conséquent essentiel de déterminer si l'asymétrie constatée est supérieure (ou au contraire inférieure) à l'asymétrie physiologique liée au cercle.

La vérification de l'asymétrie des athlètes lors d'événements sportifs, comme lors des points de contrôle des courses d'endurance, ou lors de leur préparation, serait complémentaire à l'examen locomoteur.

Ces seuils seront aussi utiles dans des contextes d'utilisation scientifique. Comme exprimé dans le Chapitre 1.4.3, de nombreuses études ont besoin de définir si les chevaux inclus sont symétriques ou asymétriques.

Outre le travail au sujet des seuils, d'autres études ont été encadrées au cours de cette thèse. Ces études portaient sur l'utilisation du système dans d'autres contextes cliniques concernant les tests de flexion, les anesthésies diagnostiques et le suivi locomoteur du cheval athlète.

7.5.4 Limites d'utilisation des seuils

L'objectif des travaux de cette thèse était de comparer l'asymétrie en l'absence d'anomalies locomotrices et en présence d'une boiterie affectant un seul membre.

Comme abordé au Chapitre 1.4.1, les interactions induisant des mouvements compensatoires rendent parfois difficile l'identification du membre atteint. Le groupe témoin était constitué de chevaux sains, et non de l'ensemble des chevaux ne présentant pas de boiterie sur le membre en question. Les seuils ne sont donc pas établis pour discriminer des boiteries antérieures droites avec des boiteries

postérieures gauches par exemple. Une nouvelle étude serait nécessaire pour établir les seuils différenciant l'asymétrie liée à la boiterie du membre étudié et l'asymétrie liée aux mouvements compensatoires d'une boiterie située sur le membre diagonal ou ipsilatéral. Cependant les dernières publications qui s'intéressent aux mouvements compensatoires rapportent le rôle essentiel du garrot pour discriminer les boiteries antérieures et postérieures (Marunova et al., 2022; Persson-Sjodin et al., 2023). Deux remarques sur les résultats de notre travail présument que les seuils permettent l'identification du membre atteint malgré les mouvements compensatoires :

- Le pouvoir discriminant des indices de la croupe pour détecter les boiteries antérieures, et le pouvoir du garrot ou de la tête pour détecter les boiteries postérieures sont faibles.
- Les intervalles de confiance des seuils de détection des boiteries droites et gauches (non diagonales) ne se superposent pas pour les indices pertinents.

De même, ces seuils n'ont pas été établis dans le but d'identifier le membre le plus boiteux lors de boiteries affectant plusieurs membres. Cet objectif nécessiterait aussi une analyse dédiée.

Enfin, la sévérité des boiteries affectant les chevaux inclus est comprise entre 2/10 et 6/10. EQUISYM® est un outil dont le but premier est la quantification des boiteries. Certes sa capacité à détecter la boiterie a été étudiée ici, mais sa capacité à grader leur sévérité nécessite des cohortes plus importantes de chevaux pour être valablement étudiée. Les zones vertes, jaunes et rouges ne servent donc pas à grader la sévérité de la boiterie.

Limites des seuils établis par indice

L'affichage de l'IC95 sur tous les indices peut être trompeur. En effet, l'intervalle de confiance ne reflète pas la sensibilité et spécificité associées au seuil. L'intervalle de confiance représente la plage où se situerait le seuil réel associé aux meilleures sensibilité et spécificité sur la population réelle. Cependant pour certains indices ces meilleures sensibilité et spécificité peuvent être relativement plus faibles que d'autres. Par exemple, pour le AI-max du garrot en ligne droite, la borne la plus basse de l'IC95 de la sensibilité est à 48% et celle de la spécificité à 59%. Ces seuils ne devraient par

conséquent pas être pris en compte avec la même confiance que ceux du AI-up du garrot par exemple dont la borne la plus basse de l'IC95 de la sensibilité est à 74% et celle de la spécificité à 78%. Le choix de n'affecter que les seuils des indices dont la somme de sensibilité et spécificité dépasse 150% sera donc appliqué sur l'interface EQUISYM®.

Dans le but de rendre analysable les résultats fournis par EQUISYM®, seuls 9 indices d'asymétrie ont été sélectionnés sur la base de ce travail. Or cette sélection d'indices limités au déplacement dorso-ventral du tronc ne permet pas de représenter la totalité des signes cliniques associés à des anomalies locomotrices. L'aide apportée par ce travail est limitée à l'interprétation de chaque indice d'asymétrie pris individuellement. La conclusion pourrait alors être délicate si les interprétations individuelles des indices ne convergent pas.

L'aide à l'interprétation des données serait optimale si les probabilités d'atteinte de chaque membre étaient calculées sur la base de l'ensemble des mesures enregistrées. Dans cette optique, une étude encadrée au cours de cette thèse a utilisé des méthodes d'analyses multivariées. Ces analyses classifient des groupes de chevaux boiteux de chaque membre et un groupe de chevaux sains à partir de l'ensemble des indices d'asymétrie, incluant ceux temporels et ceux issus des signaux des capteurs membres. Les résultats apportent donc, en plus d'une aide simplifiée et plus fiable à la détection de la boiterie, une aide à l'identification du membre boiteux. L'algorithme de classification sera implanté par la suite dans l'application EQUISYM®. D'autres études dans le domaine font aussi appel à des analyses multivariées pour étudier le lien entre l'asymétrie et l'évaluation visuelle de la boiterie (Marunova et al., 2022; Pfau et al., 2022; Pfau et al., 2007).

7.6 Synthèse

Les résultats des études menées au cours de cette thèse sont à destination des utilisateurs d'EQUISYM®, les vétérinaires équins. Pour un protocole au plus proche de son utilisation future, les données ont donc été enregistrées au cours des consultations quotidiennes au sein d'une clinique spécialisée, le CIRALE. Pour obtenir une évaluation de la boiterie considérée comme une référence par la communauté vétérinaire, le diagnostic locomoteur visuel provient du compte rendu rédigé par le

clinicien spécialiste en locomotion équine en charge de la consultation. Cette évaluation comporte une part de subjectivité.

Malgré des améliorations possibles, l'outil de mesure d'asymétrie a été optimisé pour son utilisation par des vétérinaires et pour afficher des mesures d'asymétrie simples et répétables.

Les seuils d'asymétrie établis dans ce travail sont une aide préliminaire à l'interprétation des résultats fournis par cet outil de quantification d'asymétrie. Ce travail est essentiel à l'utilisation de l'outil comme une aide au diagnostic locomoteur. Cependant le diagnostic d'une boiterie relève de la compétence d'un vétérinaire, car les mesures d'asymétrie comportent des limites sur leur interprétation clinique. En effet, les liens entre asymétrie, boiterie, douleur et lésions sont complexes.

La combinaison d'une grande diversité de locomotion chez les chevaux sains et d'une grande diversité d'expressions cliniques des lésions est l'obstacle majeur à la définition de seuils fixes et fiables d'asymétrie pour la détection de boiterie. L'établissement de ces seuils constitue néanmoins une étape préliminaire indispensable pour éviter que toute asymétrie mesurée (en particulier sur un cercle) ne soit confondue avec une anomalie locomotrice.

Dans un contexte différent, la comparaison de mesures prises sur un même individu (chaque cheval pourrait être considéré comme sa propre référence) permettrait de s'affranchir de la variation locomotrice physiologique individuelle. L'étude des changements locomoteurs et de l'évolution des indices d'asymétrie au cours du temps pour un même individu constitue à ce titre une piste de développement essentielle de ces systèmes afin d'améliorer la détection précoce de boiterie et le suivi de réhabilitation sportive.



CHAPITRE 8

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

8.1 Contributions du travail de thèse

Ce travail a d'abord mis en évidence les limites de la répétabilité des indices d'asymétrie mesurés par EQUISYM® sur la ligne droite et sur les cercles. Il a été montré que l'opérateur et son niveau d'expérience n'induisait pas de variabilité notable sur ces mesures, et que la variation de l'asymétrie intra-individuelle est plus faible sur le garrot et le pelvis que sur la tête et en ligne droite.

L'étude suivante a mesuré une variabilité d'asymétrie dans un groupe de chevaux considérés comme sains.

Ce groupe a servi de témoin pour comparaison avec des groupes de chevaux qui présentaient une boiterie d'un seul membre de grade $> 1/10$ en ligne droite selon un vétérinaire spécialiste en locomotion. Ainsi l'asymétrie de l'Amplitude d'élévation et du Minimum du déplacement dorso-ventral du garrot et de la tête discriminant avec les plus hautes sensibilité et spécificité les boiteries antérieures des chevaux sains. L'asymétrie de l'Amplitude d'élévation et du Maximum du déplacement dorso-ventral du pelvis discriminant avec les plus hautes sensibilité et spécificité les boiteries postérieures des chevaux sains. Des seuils d'asymétrie associés à ce pouvoir discriminant ont été déterminés dans cette thèse pour chaque membre et chaque indice pertinent.

La dernière étude portait sur la locomotion sur le cercle sur sol dur. Un groupe de chevaux sains a servi de témoin pour comparer la locomotion séparément à main droite et à main gauche avec un groupe boitant de l'antérieur droit sur les 2 mains et un groupe boitant de l'antérieur gauche sur les 2 mains selon un vétérinaire spécialiste en locomotion. Ainsi l'asymétrie de l'Amplitude d'élévation, du Minimum et du temps séparant 2 maxima successifs du déplacement dorso-ventral de la tête discriminant avec les plus hautes sensibilités et spécificités les boiteries antérieures lorsque l'antérieur boiteux est à l'intérieur du cercle. De même, l'asymétrie de l'Amplitude d'élévation, du Minimum et du temps séparant 2 maxima successifs du déplacement dorso-ventral du garrot et l'Amplitude d'élévation de la tête discriminant avec les plus hautes sensibilités et spécificité les boiteries antérieures lorsque l'antérieur boiteux est

à l'extérieur du cercle. Des seuils d'asymétrie associés aux plus hautes sensibilité et spécificité ont été déterminés dans cette thèse pour chaque antérieur, chaque indice pertinent et chaque main.

8.2 Perspectives scientifiques

8.2.1 Perspectives au sujet de la boiterie

Ce travail a donné des résultats préliminaires intéressants. Les seuils calculés méritent d'être constamment affinés avec le recueil d'un nombre croissant de chevaux, particulièrement des chevaux sains. Cette étude pourrait être élargie à des conditions de terrain rencontrées par les vétérinaires itinérants, mais surtout aux cercles sur sol souple qui sont essentiels au diagnostic des boiteries.

Des limites sont induites par l'analyse individuelle des indices et la sélection des indices les plus pertinents. Les boiteries manifestées par d'autres signes analysés par l'œil d'un vétérinaire, mais n'impactant pas les indices issus du déplacement dorso-ventral de la tête et du tronc, méritent d'être également explorées. C'est pourquoi l'analyse multivariée prenant en compte plusieurs indices, dont des indices issus du mouvement des membres, est une piste d'amélioration de ce travail. Ces indices ajoutés comprendraient l'angle de protraction et l'angle de rétraction des membres, l'angle de flexion-extension du dos, la descente des boulets et l'asymétrie temporelle. Ces axes de recherche sont actuellement explorés par Emma Poizat avec sa thèse d'exercice vétérinaire (ENVA), Chloé Hatrisse doctorante (Université de Lyon 1) et Mahaut Gérard doctorante CIFRE (LIM France – ENVA – TELUQ).

La principale limite rencontrée pour l'utilisation de ces systèmes de quantification de boiterie sur le terrain et par la communauté scientifique est la forte variabilité de l'asymétrie physiologique individuelle. C'est pourquoi l'approche longitudinale semble pertinente en quantifiant les modifications de locomotion chez un même cheval. Le travail préliminaire sur la reproductibilité réalisé pendant cette thèse a permis de débiter l'exploration d'axes de recherche sur les seuils de différence d'asymétrie signant une modification de la locomotion. Un suivi longitudinal de la locomotion au cours de la période d'entraînement serait la clé de la détection précoce des lésions.

La difficulté de ce suivi longitudinal est la définition de l'instant où la locomotion du cheval doit être considérée comme déviante de son schéma locomoteur de base.

Malgré son importance, l'asymétrie physiologique sur le cercle montre une forte variabilité due à la réalisation de la figure. Cette variation intra-individuelle sur le cercle pourrait être une limite pour les perspectives citées ci-dessus. En effet elle est une limite pour la comparaison chez un même cheval de sa locomotion entre les cercles qu'il réalisera. L'identification du lien entre les facteurs facilement mesurables et l'asymétrie physiologique induite par le fait de tourner permettrait une prédiction de cette dernière.

Enfin la quantification de l'ensemble des mouvements du cheval a pour ultime objectif d'associer un pattern locomoteur à l'expression d'une lésion précise, même à un stade précoce. Une analyse par des méthodes de « machine learning » d'un grand nombre de données mettrait en relation les mesures locomotrices et le diagnostic de la ou les lésion(s) ayant une signification clinique. Ainsi les probabilités des lésions locomotrices affectant le cheval pourraient être calculées pour chaque cas mesuré avec EQUISYM®. Le travail de Mahaut Gérard, débutant une thèse CIFRE impliquant LIM France, l'ENVA et TELUQ, s'ancre dans cette perspective.

8.2.2 Contribution de ce travail aux autres projets de recherche de l'entreprise

Une partie de ce travail a consisté au développement un système de quantification de l'asymétrie. Il peut être utilisé en association avec d'autres outils ou dans d'autres circonstances que pour l'examen locomoteur du cheval. Ce travail ajoute une pierre dans la réalisation d'autres projets menés par le groupe LIM.

La thèse de Marie Sapone (2020) a posé les bases d'un projet de développement de guêtres connectées. L'objectif de ces guêtres serait de détecter des boiteries uniquement avec des capteurs situés sur les membres, voire uniquement situés sur les antérieurs. Ce dispositif allégé par rapport à EQUISYM® serait alors mis en place à chaque entraînement et permettrait un suivi quotidien de la locomotion. Ce projet nécessite une analyse préliminaire grâce à des méthodes de « machine learning » pour prédire le déplacement dorso-ventral du garrot et du pelvis à partir des capteurs

des membres. Ainsi les résultats de cette thèse obtenus avec EQUISYM® seront transposables aux données obtenues avec les guêtres connectées.

Arioneo, marque du groupe LIM commercialisant EQUISYM®, a développé un outil faisant leur réputation : l'EQUIMETRE®. Ce dernier est une sangle mesurant la fréquence cardiaque à l'effort et est particulièrement utilisée pour les chevaux de course. L'objectif de la synergie des deux systèmes est de coupler les mesures physiologiques (fréquence cardiaque) aux mesures biomécaniques pour un suivi sportif complet du cheval athlète. Le développement des guêtres connectées faciliterait alors ce suivi.

Enfin la reconnaissance vidéo des points anatomiques d'intérêt semble être le système de mesure le plus prometteur car le plus adapté à la pratique vétérinaire de terrain. EQUISYM® rassemble des vidéos synchronisées aux données de mesure inertielle fiable du cheval. Il serait donc une source non négligeable de données pour le développement de cet axe de recherche.

Références bibliographiques

Adair, S., Baus, M., Belknap, J., Bell, R., Boero, M., Bussy, C., Cardenas, F., Casey, T., Castro, J., Davis, W., Erskine, M., Farr, R., Fischer, T., Forbes, B., Ford, T., Genovese, R., Gottschalk, R., Hoge, M., Honnas, C., ... Wilson, D. A. (2018). Response to Letter to the Editor : Do we have to redefine lameness in the era of quantitative gait analysis. *Equine Veterinary Journal*, 50(3), 415-417. <https://doi.org/10.1111/evj.12820>

Arkell, M., Archer, R. M., Guitian, F. J., & May, S. A. (2006). Evidence of bias affecting the interpretation of the results of local anaesthetic nerve blocks when assessing lameness in horses. *Veterinary Record*, 159(11), 346-348. <https://doi.org/10.1136/vr.159.11.346>

Audigié, F., Pourcelot, P., Degueurce, C., Geiger, D., & Denoix, J. M. (2002). Fourier analysis of trunk displacements : A method to identify the lame limb in trotting horses. *Journal of Biomechanics*, 35(9), 1173-1182. [https://doi.org/10.1016/S0021-9290\(02\)00089-1](https://doi.org/10.1016/S0021-9290(02)00089-1)

Audigié, F., Pourcelot, P., Degueurce, C., Geigert, D., & Denoix, J.-M. (2001). Kinematic analysis of the symmetry of limb movements in lame trotting horses. *Equine Veterinary Journal*, 33(S33), 128-134. <https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.2001.tb05375.x>

Back, W., & Clayton, H. M. (2013). *Equine locomotion* (2e éd.). Saunders.

Back, W., Schamhardt, H. C., Savelberg, H. H. C. M., Bogert, A. J., Bruin, G., Hartman, W., & Barneveld, A. (1995). How the horse moves : 1. Significance of graphical representations of equine forelimb kinematics. *Equine Veterinary Journal*, 27(1), 31-38. <https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.1995.tb03029.x>

Bailey, J., Redpath, A., Hallowell, G., & Bowen, M. (2022). An objective study into the effects of an incline on naturally occurring lameness in horses. *Veterinary Medicine and Science*, 8(6), 2390-2395. <https://doi.org/10.1002/vms3.900>

Barrey, E. (1999). Methods, Applications and Limitations of Gait Analysis in Horses. *The Veterinary Journal*, 157(1), 7-22. <https://doi.org/10.1053/tvj.1998.0297>

Barrey, E., Auvinet, B., & Couroucé, A. (1995). Gait evaluation of race trotters using an accelerometric device. *Equine Veterinary Journal*, 27(S18), 156-160. <https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.1995.tb04910.x>

Barrey, E., & Desbrosse, F. (1996). Lameness detection using an accelerometric device. *Pferdeheilkunde*, 12(4), 617-622.

Barrey, E., & Galloux, P. (1997). Analysis of the equine jumping technique by accelerometry. *Equine Veterinary Journal*, 29(S23), 45-49. <https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.1997.tb05052.x>

Barrey, E., Hermelin, M., Vaudelin, J. L., Poirel, D., & Valette, J. P. (1994). Utilisation of an accelerometric device in equine gait analysis. *Equine Veterinary Journal*, 26(S17), 7-12. <https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.1994.tb04864.x>

Baxter, G. M. (2020). *Adams and Stashak's Lameness in Horses (7e éd.)*. Wiley.

Bell, R. P., Reed, S. K., Schoonover, M. J., Whitfield, C. T., Yonezawa, Y., Maki, H., Pai, P. F., & Keegan, K. G. (2016). Associations of force plate and body-mounted inertial sensor measurements for identification of hind limb lameness in horses. *American Journal of Veterinary Research*, 77(4), 337-345. <https://doi.org/10.2460/ajvr.77.4.337>

Biau, S. (2004). Évolution de la locomotion du cheval de dressage au cours des premières années d'entraînement. *Infor marechalerie*, 109, 46-56.

Biau, S., & Barrey, E. (2004). Relationships between stride characteristics and scores in dressage tests: *Pferdeheilkunde Equine Medicine*, 20(2), 140-144. <https://doi.org/10.21836/PEM20040205>

Biewener, A. A. (1998). Muscle-tendon stresses and elastic energy storage during locomotion in the horse. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 120(1), 73-87. [https://doi.org/10.1016/S0305-0491\(98\)00024-8](https://doi.org/10.1016/S0305-0491(98)00024-8)

Bobbert, M. F., & Schamhardt, H. C. (1990). Accuracy of determining the point of force application with piezoelectric force plates. *Journal of Biomechanics*, 23(7), 705-710. [https://doi.org/10.1016/0021-9290\(90\)90169-4](https://doi.org/10.1016/0021-9290(90)90169-4)

Bogert, A. J. van D., Weeren, P. R. van, & Schamhardt, H. C. (1990). Correction for skin displacement errors in movement analysis of the horse. *Journal of Biomechanics*, 23(1), 97-101. [https://doi.org/10.1016/0021-9290\(90\)90374-C](https://doi.org/10.1016/0021-9290(90)90374-C)

Bosch, S., Serra Bragança, F., Marin-Perianu, M., Marin-Perianu, R., van der Zwaag, B., Voskamp, J., Back, W., van Weeren, R., & Havinga, P. (2018). *EquiMoves: A Wireless*

Networked Inertial Measurement System for Objective Examination of Horse Gait. Sensors, 18(3), 850. <https://doi.org/10.3390/s18030850>

Bragança, F. M. S., Brommer, H., van den Belt, A. J. M., Maree, J. T. M., van Weeren, P. R., & van Oldruitenborgh-Oosterbaan, M. M. S. (2020). Subjective and objective evaluations of horses for fit-to-compete or unfit-to-compete judgement. The Veterinary Journal, 257, 105454. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2020.105454>

Buchner, H. H. F., Savelberg, H. H. C. M., Schamhardt, H. C., & Barneveld, A. (1996a). Head and trunk movement adaptations in horses with experimentally induced fore- or hindlimb lameness. Equine Veterinary Journal, 28(1), 71-76. <https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.1996.tb01592.x>

Buchner, H. H. F., Savelberg, H. H. C. M., Schamhardt, H. C., & Barneveld, A. (1996b). Limb movement adaptations in horses with experimentally induced fore- or hindlimb lameness. Equine Veterinary Journal, 28(1), 63-70. <https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.1996.tb01591.x>

Buchner, H. H. F., Savelberg, H. H. C., Schamhardt, H. C., & Barneveld, A. (1995). Temporal stride patterns in horses with experimentally induced fore- or hindlimb lameness. Equine Veterinary Journal, S18, 161-165.

Byström, A., Clayton, H. M., Hernlund, E., Rhodin, M., & Egenvall, A. (2020). Equestrian and biomechanical perspectives on laterality in the horse. Comparative Exercise Physiology, 16(1), 35-45. <https://doi.org/10.3920/CEP190022>

Chateau, H., Camus, M., Holden-Douilly, L., Falala, S., Ravary, B., Vergari, C., Lepley, J., Denoix, J.-M., Pourcelot, P., & Crevier-Denoix, N. (2013). Kinetics of the forelimb in horses circling on different ground surfaces at the trot. The Veterinary Journal, 198, e20-e26. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2013.09.028>

Chateau, H., Robin, D., Simonelli, T., Pacquet, L., Pourcelot, P., Falala, S., Denoix, J.-M., & Crevier-Denoix, N. (2009). Design and validation of a dynamometric horseshoe for the measurement of three-dimensional ground reaction force on a moving horse. Journal of Biomechanics, 42(3), 336-340. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2008.11.017>

Christovão, F. G., Basile, R. C., Queiroz-Neto, A., Lacerda-Neto, J. C., & Barros, R. M. L. (2008). Videographic kinematic analysis of lame hindlimb equine movements. ARS VETERINARIA, Jaboticabal, SP, 24(3), 166-171.

Clayton, H. M. (1996). *Instrumentation and Techniques in Locomotion and Lameness. Veterinary Clinics of North America: Equine Practice*, 12(2), 337-350. [https://doi.org/10.1016/S0749-0739\(17\)30285-7](https://doi.org/10.1016/S0749-0739(17)30285-7)

Clayton, H. M., Schamhardt, H. C., Willemen, M. A., Lanovaz, J. L., & Colborne, G. R. (2000). *Kinematics and ground reaction forces in horses with superficial digital flexor tendinitis. American Journal of Veterinary Research*, 61(2), 191-196. <https://doi.org/10.2460/ajvr.2000.61.191>

Crecan, C. M., Morar, I. A., Lupsan, A. F., Lupsan, C. C., Rus, M. A., & Repciuc, C. C. (2022). *Development of a Novel Approach for Detection of Equine Lameness Based on Inertial Sensors : A Preliminary Study. Sensors*, 22(18), 7082. <https://doi.org/10.3390/s22187082>

Crevier-Denoix, N., Robin, D., Pourcelot, P., Falala, S., Holden, L., Estoup, P., Desquilbet, L., Denoix, J. M., & Chateau, H. (2010). *Ground reaction force and kinematic analysis of limb loading on two different beach sand tracks in harness trotters : Ground reaction forces on sand. Equine Veterinary Journal*, 42, 544-551. <https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.2010.00202.x>

Cruz, A. M., Maninchedda, U. E., Burger, D., Wanda, S., & Vidondo, B. (2017). *Repeatability of gait pattern variables measured by use of extremity-mounted inertial measurement units in nonlame horses during trotting. American Journal of Veterinary Research*, 78(9), 1011-1018. <https://doi.org/10.2460/ajvr.78.9.1011>

Denoix, J. M. (2021). *A Look at Lameness Through the Eyes of Functional Anatomy (and Biomechanics). AAEP proceedings*, 67, 106-133.

Deuel, N. R., Schamhardt, H. C., & Merkens, H. W. (1995). *Kinematics of induced reversible hind and fore hoof lamenesses in horses at the trot. Equine Veterinary Journal*, 27(S18), 147-151. <https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.1995.tb04908.x>

Donnell, J. R., Frisbie, D. D., King, M. R., Goodrich, L. R., & Haussler, K. K. (2015). *Comparison of subjective lameness evaluation, force platforms and an inertial-sensor system to identify mild lameness in an equine osteoarthritis model. The Veterinary Journal*, 206(2), 136-142. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2015.08.004>

Dow, S. M., Leendertz, J. A., Silver, I. A., & Goodship, A. E. (1991). *Identification of subclinical tendon injury from ground reaction force analysis. Equine Veterinary Journal*, 23(4), 266-272. <https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.1991.tb03715.x>

Drevemo, S., Fredricson, I., Hjertén, G., & McMIKEN, D. (1987). Early development of gait asymmetries in trotting Standardbred colts. *Equine Veterinary Journal*, 19(3), 189-191. <https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.1987.tb01373.x>

Dutto, D. J., Hoyt, D. F., Cogger, E. A., & Wickler, S. J. (2004). Ground reaction forces in horses trotting up an incline and on the level over a range of speeds. *Journal of Experimental Biology*, 207(20), 3507-3514. <https://doi.org/10.1242/jeb.01171>

Dyson, S. (2000). Lameness and Poor Performance in the Sports Horse : Dressage, Show Jumping and Horse Trials (Eventing). *AAEP Proceedings*, 46.

Dyson, S. (2011). Can lameness be graded reliably? : Can lameness be graded reliably? *Equine Veterinary Journal*, 43(4), 379-382. <https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.2011.00391.x>

Dyson, S. (2013). *Equine Lameness : Clinical Judgment Meets Advanced Diagnostic Imaging*. 59, 92-122.

Dyson, S. (2014). Recognition of lameness : Man versus machine. *The Veterinary Journal*, 201(3), 245-248. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2014.05.018>

Dyson, S., & Greve, L. (2016). Subjective Gait Assessment of 57 Sports Horses in Normal Work : A Comparison of the Response to Flexion Tests, Movement in Hand, on the Lunge, and Ridden. *Journal of Equine Veterinary Science*, 38, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.jevs.2015.12.012>

Ehara, Y., Fujimoto, H., Miyazaki, S., Mochimaru, M., Tanaka, S., & Yamamoto, S. (1997). Comparison of the performance of 3D camera systems II. *Gait & Posture*, 5(3), 251-255. [https://doi.org/10.1016/S0966-6362\(96\)01093-4](https://doi.org/10.1016/S0966-6362(96)01093-4)

Eichelberger, P., Ferraro, M., Minder, U., Denton, T., Blasimann, A., Krause, F., & Baur, H. (2016). Analysis of accuracy in optical motion capture – A protocol for laboratory setup evaluation. *Journal of Biomechanics*, 49(10), 2085-2088. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2016.05.007>

Evrard, L., Joostens, Z., Vandersmissen, M., Audigié, F., & Busoni, V. (2021). Comparison Between Ultrasonographic and Standing Magnetic Resonance Imaging Findings in the Podotrochlear Apparatus of Horses With Foot Pain. *Frontiers in Veterinary Science*, 8, 675180. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.675180>

- Faber, G. S., Chang, C.-C., Kingma, I., Martin Schepers, H., Herber, S., Veltink, P. H., & Dennerlein, J. T. (2012). A force plate based method for the calibration of force/torque sensors. *Journal of Biomechanics*, 45(7), 1332-1338. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2012.01.024>
- Fuller, C. J., Bladon, B. M., Driver, A. J., & Barr, A. R. S. (2006). The intra- and inter-assessor reliability of measurement of functional outcome by lameness scoring in horses. *The Veterinary Journal*, 6.
- Galisteo, A. M., Cano, M. R., Morales, J. L., Miró, F., Vivo, J., & Agüera, E. (1997). Kinematics in horses at the trot before and after an induced forelimb supporting lameness. *Equine Veterinary Journal*, 29(S23), 97-101. <https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.1997.tb05064.x>
- Galisteo, A. M., Cano, M. R., Morales, J. L., Vivo, J., & Miro, F. (1998). The influence of speed and height at the withers on the kinematics of sound horses at the handled trot. *Veterinary Research Communications*, 22, 415-423.
- Gingerich, D. A., Auer, J. A., & Fackelman, G. E. (1979). Force plate studies on the effect of exogenous hyaluronic acid on joint function in equine arthritis. *Journal of Veterinary Pharmacology and Therapeutics*, 2(4), 291-298. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2885.1979.tb00403.x>
- Gómez Álvarez, C. B., & Oosterlinck, M. (2022). The ongoing quest for a validated, universally accepted visual lameness grading scale. *Equine Veterinary Journal*, evj.13896. <https://doi.org/10.1111/evj.13896>
- Greve, L., & Dyson, S. (2016). Body lean angle in sound dressage horses in-hand, on the lunge and ridden. *The Veterinary Journal*, 217, 52-57. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2016.06.004>
- Greve, L., & Dyson, S. J. (2014). The interrelationship of lameness, saddle slip and back shape in the general sports horse population. *Equine Veterinary Journal*, 46(6), 687-694. <https://doi.org/10.1111/evj.12222>
- Greve, L., Pfau, T., & Dyson, S. (2017). Thoracolumbar movement in sound horses trotting in straight lines in hand and on the lunge and the relationship with hind limb symmetry or asymmetry. *The Veterinary Journal*, 220, 95-104. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2017.01.003>
- Greve, L., Pfau, T., & Dyson, S. (2018). Alterations in body lean angle in lame horses before and after diagnostic analgesia in straight lines in hand and on the lunge. *The Veterinary Journal*, 239, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2018.07.006>

Hammarberg, M., Egenvall, A., Pfau, T., & Rhodin, M. (2016). Rater agreement of visual lameness assessment in horses during lungeing. *Equine Veterinary Journal*, 48(1), 78-82. <https://doi.org/10.1111/evj.12385>

Hardeman, A. (2021). Large scale clinical application of quantitative gait analysis in horses; constraints and added value.

Hardeman, A. M., Byström, A., Roepstorff, L., Swagemakers, J. H., van Weeren, P. R., & Serra Bragança, F. M. (2020). Range of motion and between-measurement variation of spinal kinematics in sound horses at trot on the straight line and on the lunge. *PLOS ONE*, 15(2), e0222822. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0222822>

Hardeman, A. M., Egenvall, A., Serra Bragança, F. M., Koene, M. H. W., Swagemakers, J., Roepstorff, L., Weeren, R., & Byström, A. (2021). Movement asymmetries in horses presented for prepurchase or lameness examination. *Equine Veterinary Journal*, 54(2), 334-346. <https://doi.org/10.1111/evj.13453>

Hardeman, A. M., Egenvall, A., Serra Bragança, F. M., Swagemakers, J., Koene, M. H. W., Roepstorff, L., Weeren, R., & Byström, A. (2022). Visual lameness assessment in comparison to quantitative gait analysis data in horses. *Equine Veterinary Journal*, 54(6), 1076-1085. <https://doi.org/10.1111/evj.13545>

Hardeman, A. M., Serra Bragança, F. M., Swagemakers, J. H., Weeren, P. R., & Roepstorff, L. (2019). Variation in gait parameters used for objective lameness assessment in sound horses at the trot on the straight line and the lunge. *Equine Veterinary Journal*, 51(6), 831-839. <https://doi.org/10.1111/evj.13075>

Hardeman, A. M., Weeren, P. R., Serra Bragança, F. M., Warmerdam, H., & Bok, H. G. J. (2021). A first exploration of perceived pros and cons of quantitative gait analysis in equine clinical practice. *Equine Veterinary Education*, 34(10), e438-e444. <https://doi.org/10.1111/eve.13505>

Hatrisse, C., Frassetto, C., Jacquet, S., De Azevedo, E., Macaire, C., Martin, P., Marin, F., Chateau, H., & Cheze, L. (2022). Stance phase detection by inertial measurement unit placed on the metacarpus of horses trotting on underwater treadmill at different water heights. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 25(sup1), S144-S146. <https://doi.org/10.1080/10255842.2022.2116885>

Hatrisse, C., Macaire, C., Sapone, M., Hebert, C., Hanne-Poujade, S., De Azevedo, E., Marin, F., Martin, P., & Chateau, H. (2022). Stance Phase Detection by Inertial Measurement Unit

Placed on the Metacarpus of Horses Trotting on Hard and Soft Straight Lines and Circles. Sensors, 22(3), 703. <https://doi.org/10.3390/s22030703>

Heim, C., Pfau, T., Gerber, V., Schweizer, C., Doherr, M., Schüpbach-Regula, G., & Witte, S. (2016). Determination of vertebral range of motion using inertial measurement units in 27 Franches-Montagnes stallions and comparison between conditions and with a mixed population. Equine Veterinary Journal, 48(4), 509-516. <https://doi.org/10.1111/evj.12455>

Hewetson, M., Christley, R. M., Hunt, I. D., & Voute, L. C. (2006). Investigations of the reliability of observational gait analysis for the assessment of lameness in horses. Veterinary Record, 158(25), 852-858. <https://doi.org/10.1136/vr.158.25.852>

Hobbs, S. J., Robinson, M. A., & Clayton, H. M. (2018). A simple method of equine limb force vector analysis and its potential applications. PeerJ, 6, e4399. <https://doi.org/10.7717/peerj.4399>

Holcombe, A. O. (2009). Seeing slow and seeing fast: Two limits on perception. Trends in Cognitive Sciences, 13(5), 216-221. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2009.02.005>

Hoogmoed, L. M., Snyder, J. R., Thomas, H. L., & Harmon, F. A. (2003). Retrospective evaluation of equine prepurchase examinations performed 1991-2000. Equine Veterinary Journal, 35(4), 375-381. <https://doi.org/10.2746/042516403776014325>

Hopkins, S., & Pfau, T. (2014). Effect of Side of Handling on Movement Symmetry in Horses. Equine Veterinary Journal, 46, 42-42. https://doi.org/10.1111/evj.12267_127

International Vocabulary of Metrology—Basic and General Concepts and Associated Terms. (2008). Chemistry International Newsmagazine for IUPAC, 30(6), 21-22. <https://doi.org/10.1515/ci.2008.30.6.21>

Ishihara, A., Bertone, A. L., & Rajala-Schultz, P. J. (2005). Association between subjective lameness grade and kinetic gait parameters in horses with experimentally induced forelimb lameness. American Journal of Veterinary Research, 66(10), 1805-1815. <https://doi.org/10.2460/ajvr.2005.66.1805>

ISO 5725-1:1994, ISO 5725-1:1994 (1994).

Jung, A. (2021). Untersuchung der Bewegungsasymmetrie von neun Pferden im Trab vergleichend mittels subjektiver Beurteilung von Videos und berechneter Asymmetrie-Indices

der akzelerometrischen Messungen auf einer zirkulären Bahn einer Führanlage. Veterinärmedizinische Universität Wien.

Kaido, M., Kilborne, A. H., Sizemore, J. L., Reisbig, N. A., Aarnes, T. K., & Bertone, A. L. (2016). Effects of repetition within trials and frequency of trial sessions on quantitative parameters of vertical force peak in horses with naturally occurring lameness. American Journal of Veterinary Research, 77(7), 756-765. <https://doi.org/10.2460/ajvr.77.7.756>

Kallerud, A. S. (2021). Something in the way you move : Studies of movement asymmetry in young Standardbred trotters. Norwegian University of Life Sciences Faculty of Veterinary Medicine.

Kallerud, A. S., Fjordbakk, C. T., Hendrickson, E. H. S., Persson-Sjodin, E., Hammarberg, M., Rhodin, M., & Hernlund, E. (2021). Objectively measured movement asymmetry in yearling Standardbred trotters. Equine Veterinary Journal, 53(3), 590-599. <https://doi.org/10.1111/evj.13302>

Kallerud, A. S., Hernlund, E., Byström, A., Persson-Sjodin, E., Rhodin, M., Hendrickson, E. H. S., & Fjordbakk, C. T. (2021). Non-banked curved tracks influence movement symmetry in two-year-old Standardbred trotters. Equine Veterinary Journal, 53(6), 1178-1187. <https://doi.org/10.1111/evj.13409>

Keegan, K. G., Arafat, S., Skubic, M., Wilson, D. A., & Kramer, J. (2003). Detection of lameness and determination of the affected forelimb in horses by use of continuous wavelet transformation and neural network classification of kinematic data. American Journal of Veterinary Research, 64(11), 1376-1381. <https://doi.org/10.2460/ajvr.2003.64.1376>

Keegan, K. G., Dent, E. V., Wilson, D. A., Janicek, J., Kramer, J., Lacarrubba, A., Walsh, D. M., Cassells, M. W., Esther, T. M., Schiltz, P., Frees, K. E., Wilhite, C. L., Clark, J. M., Pollitt, C. C., Shaw, R., & Norris, T. (2010). Repeatability of subjective evaluation of lameness in horses: Repeatability of subjective evaluation of lameness in horses. Equine Veterinary Journal, 42(2), 92-97. <https://doi.org/10.2746/042516409X479568>

Keegan, K. G., Kramer, J., Yonezawa, Y., Maki, H., Pai, P. F., Dent, E. V., Kellerman, T. E., Wilson, D. A., & 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), 1156-1163. <https://doi.org/10.2460/ajvr.72.9.1156>

Keegan, K. G., MacAllister, C. G., Wilson, D. A., Gedon, C. A., Kramer, J., Yonezawa, Y., Maki, H., & 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), 368-374. <https://doi.org/10.2460/ajvr.73.3.368>

Keegan, K. G., Pai, P. F., Wilson, D. A., & Smith, B. K. (2001). Signal decomposition method of evaluating head movement to measure induced forelimb lameness in horses trotting on a treadmill. *Equine Veterinary Journal*, 33(5), 446-451. <https://doi.org/10.2746/042516401776254781>

Keegan, K. G., Yonezawa, Y., Pai, P. F., Wilson, D. A., & 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), 665-670. <https://doi.org/10.2460/ajvr.2004.65.665>

Kelmer, G., Keegan, K. G., Kramer, J., Wilson, D. A., Pai, F. P., & 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), 646-655. <https://doi.org/10.2460/ajvr.2005.66.646>

Kramer, J., Keegan, K. G., Kelmer, G., & Wilson, D. A. (2004). Objective determination of pelvic movement during hind limb lameness by use of a signal decomposition method and pelvic height differences. *American Journal of Veterinary Research*, 65(6), 741-747. <https://doi.org/10.2460/ajvr.2004.65.741>

Kramer, J., Keegan, K. G., Wilson, D. A., Smith, B. K., & Wilson, D. J. (2000). Kinematics of the hind limb in trotting horses after induced lameness of the distal intertarsal and tarsometatarsal joints and intra-articular administration of anesthetic. *American Journal of Veterinary Research*, 61(9), 1031-1036. <https://doi.org/10.2460/ajvr.2000.61.1031>

Kübber, P., Kastner, J., Girtler, D., & Knezevic, P. F. (1994). Erkenntnisse über den Einfluß der tiefen Palmarner:vanästhesieauf dasGangbild deslahmheits- freienPferdesmit Hilfe einer kinematischenMeßmethode. *Pferdeheilkunde*, 10, 11-21.

Kuroki, Y., Nishi, T., Kobayashi, S., Oyaizu, H., & Yoshimura, S. (2006). 3.4: Improvement of Motion Image Quality by High Frame Rate. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 37(1), 14. <https://doi.org/10.1889/1.2433276>

Lanovaz, J. L., Clayton, H. M., & Watson, L. G. (1998). *In vitro* attenuation of impact shock in equine digits. *Equine Veterinary Journal*, 30(S26), 96-102. <https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.1998.tb05127.x>

Lawin, F. J., Byström, A., Roepstorff, C., Rhodin, M., Almlöf, M., Silva, M., Andersen, P. H., Kjellström, H., & Hernlund, E. (2023). Is Markerless More or Less? Comparing a Smartphone Computer Vision Method for Equine Lameness Assessment to Multi-Camera Motion Capture. *Animals*, 13(3), 390. <https://doi.org/10.3390/ani13030390>

Loomans, J. B. A. (2008). *The equine veterinarian: Past, present and prospects of a profession*. Utrecht University.

Lopes, M. A. F., Eleuterio, A., & Mira, M. C. (2018). Objective Detection and Quantification of Irregular Gait With a Portable Inertial Sensor-Based System in Horses During an Endurance Race—A Preliminary Assessment. *Journal of Equine Veterinary Science*, 70, 123-129. <https://doi.org/10.1016/j.jevs.2018.08.008>

Lynch, J., Clayton, H., & Mullineaux, D. (2005). The reliability of force platform data from trotting horses. *Equine and Comparative Exercise Physiology*, 2(2), 129-132. <https://doi.org/10.1079/ECP200555>

Macaire, C., Hanne-Poujade, S., Azevedo, E. D., Denoix, J.-M., Coudry, V., Jacquet, S., Bertoni, L., Tallaj, A., Audigié, F., Hatrisse, C., Hébert, C., Martin, P., Marin, F., & Chateau, H. (2022). Investigation of Thresholds for Asymmetry Indices to Represent the Visual Assessment of Single Limb Lameness by Expert Veterinarians on Horses Trotting in a Straight Line. 14.

Macaire, C., Hanne-Poujade, S., De Azevedo, E., Hatrisse, C., Hébert, C., Martin, P., Marin, F., & Chateau, H. (2022). Movement asymmetry measured in sound horses trotting on a straight line. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 25(sup1), S144-S146. <https://doi.org/10.1080/10255842.2022.2116885>

MacKechnie-Guire, R., & Pfau, T. (2021). Movement asymmetries in 200 non-lame elite and non-elite horses during in-hand trot. *Equine Veterinary Journal*, 53(S55), 10-10. https://doi.org/10.1111/evj.09_13492

Maliye, S., Voute, L. C., & Marshall, J. F. (2015). Naturally-occurring forelimb lameness in the horse results in significant compensatory load redistribution during trotting. *The Veterinary Journal*, 204(2), 208-213. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2015.03.005>

Marin, F. (2020). *Human and Animal Motion Tracking Using Inertial Sensors*. *Sensors*, 20(21), 6074. <https://doi.org/10.3390/s20216074>

Martin, P. (2015). *Saddle in motion Biomécanique dorsale du cheval monté : Analyse des interactions entre la selle et le dos et application à la conception de nouveaux prototypes de selles*. Université de Lyon 1.

Martin, P., Chateau, H., Pourcelot, P., Duray, L., & Cheze, L. (2014). *Comparison Between Inertial Sensors and Motion Capture System to Quantify Flexion-Extension Motion in the Back of a Horse*. *Equine Veterinary Journal*, 46, 43-43. https://doi.org/10.1111/evj.12267_131

Marunova, E., Dod, L., Witte, S., & Pfau, T. (2021). *Smartphone-Based Pelvic Movement Asymmetry Measures for Clinical Decision Making in Equine Lameness Assessment*. *Animals*, 11, 1665.

Marunova, E., Hoenecke, K., Fiske-Jackson, A., Smith, R. K. W., Bolt, D. M., Perrier, M., Gerdes, C., Hernlund, E., Rhodin, M., & Pfau, T. (2022). *Changes in Head, Withers, and Pelvis Movement Asymmetry in Lamé Horses as a Function of Diagnostic Anesthesia Outcome, Surface and Direction*. *Journal of Equine Veterinary Science*, 118, 104136. <https://doi.org/10.1016/j.jevs.2022.104136>

May, S. A., & Wyn-Jones, G. (1987). *Identification of hindleg lameness*. *Equine Veterinary Journal*, 19(3), 185-188. <https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.1987.tb01371.x>

McCracken, M. J., Kramer, J., Keegan, K. G., Lopes, M., Wilson, D. A., Reed, S. K., LaCarrubba, A., & Rasch, M. (2012). *Comparison of an inertial sensor system of lameness quantification with subjective lameness evaluation: Comparison of inertial system with subjective lameness evaluation*. *Equine Veterinary Journal*, 44(6), 652-656. <https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.2012.00571.x>

Merkens, H. W., Schamhardt, H. C., Hartman, W., & Kersjes, A. W. (1988). *The use of H(orser) INDEX: A method of analysing the ground reaction force patterns of lame and normal gaited horses at the walk*. *Equine Veterinary Journal*, 20(1), 29-36. <https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.1988.tb01448.x>

Merkens, H. W., Schamhardt, H. C., Osch, G. J. V. M., & Bogert, A. J. (1993). *Ground reaction force patterns of Dutch Warmblood horses at normal trot*. *Equine Veterinary Journal*, 25(2), 134-137. <https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.1993.tb02923.x>

- Merriau, P., Dupuis, Y., Boutteau, R., Vasseur, P., & Savatier, X. (2017). A Study of Vicon System Positioning Performance. *Sensors*, 17(7), 1591. <https://doi.org/10.3390/s17071591>
- Mitchell, J. S. (2012). Lameness and Performance Evaluation in Ambulatory Practice. *Veterinary Clinics of North America: Equine Practice*, 28(1), 101-115. <https://doi.org/10.1016/j.cveq.2012.01.007>
- Moorman, V. J., Frisbie, D. D., Kawcak, C. E., & McIlwraith, C. W. (2017). Effects of sensor position on kinematic data obtained with an inertial sensor system during gait analysis of trotting horses. *Journal of the American Veterinary Medical Association*, 250(5), 548-553. <https://doi.org/10.2460/javma.250.5.548>
- Moorman, V. J., Reiser, R. F., Peterson, M. L., McIlwraith, C. W., & Kawcak, C. E. (2013). Effect of forelimb lameness on hoof kinematics of horses at a trot. *American Journal of Veterinary Research*, 74(9), 1183-1191. <https://doi.org/10.2460/ajvr.74.9.1183>
- Müller-Quirin, J., Dittmann, M. T., Roepstorff, C., Arpagaus, S., Latif, S. N., & Weishaupt, M. A. (2020). Riding Soundness—Comparison of Subjective With Objective Lameness Assessments of Owner-Sound Horses at Trot on a Treadmill. *Journal of Equine Veterinary Science*, 95, 103314. <https://doi.org/10.1016/j.jevs.2020.103314>
- Nielsen, T. D., Dean, R. S., Robinson, N. J., Massey, A., & Brennan, M. L. (2014). Survey of the UK veterinary profession : Common species and conditions nominated by veterinarians in practice. *Veterinary Record*, 174(13), 324-324. <https://doi.org/10.1136/vr.101745>
- Olsen, E., Pfau, T., & Ritz, C. (2013). Functional limits of agreement applied as a novel method comparison tool for accuracy and precision of inertial measurement unit derived displacement of the distal limb in horses. *Journal of Biomechanics*, 46(13), 2320-2325. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2013.06.004>
- Oosterlinck, M., Pille, F., Back, W., Dewulf, J., & Gasthuys, F. (2010). Use of a stand-alone pressure plate for the objective evaluation of forelimb symmetry in sound ponies at walk and trot. *The Veterinary Journal*, 183(3), 305-309. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2008.12.012>
- Oosterlinck, M., Pille, F., Huppes, T., Gasthuys, F., & Back, W. (2010). Comparison of pressure plate and force plate gait kinetics in sound Warmbloods at walk and trot. *The Veterinary Journal*, 186(3), 347-351. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2009.08.024>
- Oosterlinck, M., Pille, F., Sonneveld, D. C., Oomen, A. M., Gasthuys, F., & Back, W. (2012). Contribution of dynamic calibration to the measurement accuracy of a pressure plate system

throughout the stance phase in sound horses. *The Veterinary Journal*, 193(2), 471-474. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2012.01.029>

Oppong, F. B., & Agbedra, S. Y. (2016). Assessing Univariate and Multivariate Normality, A Guide For Non-Statisticians. *Mathematical Theory and Modeling*, 6(2), 26-33.

Parkes, R. S. V., Weller, R., Groth, A. M., May, S., & Pfau, T. (2009). Evidence of the development of 'domain-restricted' expertise in the recognition of asymmetric motion characteristics of hindlimb lameness in the horse. *Equine Veterinary Journal*, 41(2), 112-117. <https://doi.org/10.2746/042516408X343000>

Parmentier, J. I. M., Bosch, S., van der Zwaag, B. J., Weishaupt, M. A., Gmel, A. I., Havinga, P. J. M., van Weeren, P. R., & Braganca, F. M. S. (2023). Prediction of continuous and discrete kinetic parameters in horses from inertial measurement units data using recurrent artificial neural networks. *Scientific Reports*, 13(1), 740. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-27899-4>

Parmentier, J., Schmutz, A., Sapone, M., Mansour, K. B., Marin, F., Martin, P., & Chateau, H. (2019). Effet de la vitesse sur l'asymétrie du cheval. *JSIE* 2019.

Peham, C., Licka, T., Girtler, D., & Scheidl, M. (2001). Hindlimb lameness : Clinical judgement versus computerised symmetry measurement. *Veterinary Record*, 148(24), 750-752. <https://doi.org/10.1136/vr.148.24.750>

Peham, C., Scheidl, M., & Licka, T. (1996). A method of signal processing in motion analysis of the trotting horse. *Journal of Biomechanics*, 29(8), 1111-1114. [https://doi.org/10.1016/0021-9290\(95\)00179-4](https://doi.org/10.1016/0021-9290(95)00179-4)

Persson Sjödin, E., Serra Braganca, F., Pfau, T., Egenvall, A., Weishaupt, M., & Rhodin, M. (2016). Movement Symmetry of the Withers Can be Used to Discriminate Primary Forelimb Lameness From Compensatory Forelimb Asymmetry in Horses with Induced Lameness. *Equine Veterinary Journal*, 48, 32-33. https://doi.org/10.1111/evj.64_12595

Persson-Sjödin, E. (2020). Evaluation of vertical movement asymmetries in riding horses. *Faculty of Veterinary Medicine and Animal Science Department of Anatomy, Physiology and Biochemistry Uppsala*.

Persson-Sjödin, E., Hernlund, E., Pfau, T., Andersen, P. H., Forsström, K. H., Byström, A., Serra Bragança, F. M., Hardeman, A., Greve, L., Egenvall, A., & Rhodin, M. (2023). Withers vertical movement symmetry is useful for locating the primary lame limb in naturally occurring lameness. *Equine Veterinary Journal*, 1-13. <https://doi.org/10.1111/evj.13947>

Persson-Sjodin, E., Hernlund, E., Pfau, T., Haubro Andersen, P., Holm Forsström, K., & Rhodin, M. (2019). Effect of meloxicam treatment on movement asymmetry in riding horses in training. *PLOS ONE*, 14(8), e0221117. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0221117>

Persson-Sjodin, E., Hernlund, E., Pfau, T., Haubro Andersen, P., & Rhodin, M. (2018). Influence of seating styles on head and pelvic vertical movement symmetry in horses ridden at trot. *PLOS ONE*, 13(4), e0195341. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0195341>

Pfau, T., Bolt, D. M., Fiske-Jackson, A., Gerdes, C., Hoenecke, K., Lynch, L., Perrier, M., & Smith, R. K. W. (2022). Linear Discriminant Analysis for Investigating Differences in Upper Body Movement Symmetry in Horses before/after Diagnostic Analgesia in Relation to Expert Judgement. *Animals*, 12(6), 762. <https://doi.org/10.3390/ani12060762>

Pfau, T., Boulton, H., Davis, H., Walker, A., & Rhodin, M. (2016). Agreement between two inertial sensor gait analysis systems for lameness examinations in horses. *Equine Veterinary Education*, 28(4), 203-208. <https://doi.org/10.1111/eve.12400>

Pfau, T., Fiske-Jackson, A., & Rhodin, M. (2016). Quantitative assessment of gait parameters in horses: Useful for aiding clinical decision making? *Equine Veterinary Education*, 28(4), 209-215. <https://doi.org/10.1111/eve.12372>

Pfau, T., Jennings, C., Mitchell, H., Olsen, E., Walker, A., Egenvall, A., Tröster, S., Weller, R., & Rhodin, M. (2016). Lungeing on hard and soft surfaces: Movement symmetry of trotting horses considered sound by their owners: Movement symmetry on hard and soft surfaces on the lunge. *Equine Veterinary Journal*, 48(1), 83-89. <https://doi.org/10.1111/evj.12374>

Pfau, T., Noordwijk, K., Sepulveda Caviedes, M. F., Persson-Sjodin, E., Barstow, A., Forbes, B., & Rhodin, M. (2018). Head, withers and pelvic movement asymmetry and their relative timing in trot in racing Thoroughbreds in training. *Equine Veterinary Journal*, 50(1), 117-124. <https://doi.org/10.1111/evj.12705>

Pfau, T., Parkes, R. S., Burden, E. R., Bell, N., Fairhurst, H., & Witte, T. H. (2016). Movement asymmetry in working polo horses. *Equine Veterinary Journal*, 48(4), 517-522. <https://doi.org/10.1111/evj.12467>

Pfau, T., Persson-Sjodin, E., Gardner, H., Orssten, O., Hernlund, E., & Rhodin, M. (2021). Effect of Speed and Surface Type on Individual Rein and Combined Left–Right Circle Movement Asymmetry in Horses on the Lunge. *Frontiers in Veterinary Science*, 8, 692031. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.692031>

Pfau, T., Robilliard, J. J., Weller, R., Jespers, K., Eliashar, E., & Wilson, A. M. (2007). Assessment of mild hindlimb lameness during over ground locomotion using linear discriminant analysis of inertial sensor data. *Equine Veterinary Journal*, 39(5), 407-413. <https://doi.org/10.2746/042516407X185719>

Pfau, T., & Roepstorff, L. (2013). To limp, or not to limp, is that the question? *The Veterinary Journal*, 195(3), 269-270. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2013.01.001>

Pfau, T., Scott, W. M., & Sternberg Allen, T. (2022). Upper Body Movement Symmetry in Reining Quarter Horses during Trot In-Hand, on the Lunge and during Ridden Exercise. *Animals*, 12(5), 596. <https://doi.org/10.3390/ani12050596>

Pfau, T., Sepulveda Caviedes, M. F., McCarthy, R., Cheetham, L., Forbes, B., & Rhodin, M. (2020). Comparison of visual lameness scores to gait asymmetry in racing Thoroughbreds during trot in-hand. *Equine Veterinary Education*, 32(4), 191-198. <https://doi.org/10.1111/eve.12914>

Pfau, T., Spicer-Jenkins, C., Smith, R. K., Bolt, D. M., Fiske-Jackson, A., & 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), 759-763. <https://doi.org/10.1111/evj.12220>

Pfau, T., Stubbs, N. C., Kaiser, L. J., Brown, L. E. A., & Clayton, H. M. (2012). Effect of trotting speed and circle radius on movement symmetry in horses during lunging on a soft surface. *American Journal of Veterinary Research*, 73(12), 1890-1899. <https://doi.org/10.2460/ajvr.73.12.1890>

Pfau, T., Witte, T. H., & Wilson, A. M. (2005). A method for deriving displacement data during cyclical movement using an inertial sensor. *Journal of Experimental Biology*, 208(13), 2503-2514. <https://doi.org/10.1242/jeb.01658>

Pleasant. (1997). Intra-articular Anesthesia of the Distal Interphalangeal Joint Alleviates Lameness. *Veterinary Surgery*, 36, 137-140.

Power, M., Fell, G., & Wright, M. (2013). Principles for high-quality, high-value testing. *Evidence Based Medicine*, 18(1), 5-10. <https://doi.org/10.1136/eb-2012-100645>

Radtko, A., Fortier, L. A., Regan, S., Kraus, S., & Delco, M. L. (2020). Intra-articular anaesthesia of the equine stifle improves foot lameness. *Equine Veterinary Journal*, 52(2), 314-319. <https://doi.org/10.1111/evj.13135>

Ravary, B., Pourcelot, P., Bortolussi, C., Konieczka, S., & Crevier-Denoix, N. (2004). Strain and force transducers used in human and veterinary tendon and ligament biomechanical studies. *Clinical Biomechanics*, 19(5), 433-447. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2004.01.008>

Reed, S. K., Kramer, J., Thombs, L., Pitts, J. B., Wilson, D. A., & Keegan, K. G. (2020). Comparison of results for body-mounted inertial sensor assessment with final lameness determination in 1,224 equids. *Journal of the American Veterinary Medical Association*, 256(5), 590-599. <https://doi.org/10.2460/javma.256.5.590>

Rettig, M. J., Leelamankong, P., Rungsri, P., & Lischer, C. J. (2016). Effect of sedation on fore- and hindlimb lameness evaluation using body-mounted inertial sensors. *Equine Veterinary Journal*, 48(5), 603-607. <https://doi.org/10.1111/evj.12463>

Rettig, M. J., & Lischer, C. (2016). Immediate effect of Dallmer Hoof Clogs on head and pelvic asymmetry using body mounted inertial sensors: *Pferdeheilkunde Equine Medicine*, 32(3), 212-216. <https://doi.org/10.21836/PEM20160303>

Rhodin, M., Egenvall, A., Haubro Andersen, P., & Pfau, T. (2017). Head and pelvic movement asymmetries at trot in riding horses in training and perceived as free from lameness by the owner. *PLOS ONE*, 12(4), e0176253. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176253>

Rhodin, M., Persson-Sjodin, E., Egenvall, A., Serra Bragança, F. M., Pfau, T., Roepstorff, L., Weishaupt, M. A., Thomsen, M. H., van Weeren, P. R., & Hernlund, E. (2018). Vertical movement symmetry of the withers in horses with induced forelimb and hindlimb lameness at trot. *Equine Veterinary Journal*, 50(6), 818-824. <https://doi.org/10.1111/evj.12844>

Rhodin, M., Pfau, T., Roepstorff, L., & Egenvall, A. (2013). Effect of lungeing on head and pelvic movement asymmetry in horses with induced lameness. *The Veterinary Journal*, 198, e39-e45. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2013.09.031>

Rhodin, M., Roepstorff, L., French, A., Keegan, K. G., Pfau, T., & Egenvall, A. (2016). Head and pelvic movement asymmetry during lungeing in horses with symmetrical movement on the straight. *Equine Veterinary Journal*, 48(3), 315-320. <https://doi.org/10.1111/evj.12446>

Rhodin, M., Smit, I. H., Persson-Sjodin, E., Pfau, T., Gunnarsson, V., Björnsdóttir, S., Zetterberg, E., Clayton, H. M., Hobbs, S. J., Serra Bragança, F., & Hernlund, E. (2022). Timing of Vertical Head, Withers and Pelvis Movements Relative to the Footfalls in Different Equine Gaits and Breeds. *Animals*, 12(21), 3053. <https://doi.org/10.3390/ani12213053>

Robartes, H., Fairhurst, H., & Pfau, T. (2013). Head and pelvic movement symmetry in horses during circular motion and in rising trot. *The Veterinary Journal*, 198, e52-e58. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2013.09.033>

Roepstorff, C., Imogen Gmel, A., Arpagaus, S., Manuel Serra Bragança, F., Hernlund, E., Roepstorff, L., Rhodin, M., & Andreas Weishaupt, M. (2022). Modelling fore- and hindlimb peak vertical force differences in trotting horses using upper body kinematic asymmetry variables. *Journal of Biomechanics*, 111097. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2022.111097>

Ross, M. W., & Dyson, S. J. (2011). *Diagnosis and management of lameness in the horse* (2e éd.). Elsevier.

Ross, W. A., Kaneene, J. B., Caron, J. P., Gallagher, K. F., & Gardiner, J. C. (1999). Factors influencing recovery from and duration of lameness in Michigan (USA) horses. *Preventive Veterinary Medicine*, 40(2), 127-138. [https://doi.org/10.1016/S0167-5877\(99\)00028-8](https://doi.org/10.1016/S0167-5877(99)00028-8)

Sagot, S. (2013). *Enquête nationale 2012—Etude des coûts et des pratiques sanitaires en structures équine. Réseau économique de la filière équine.*

Sapone, M. (2020). *Conception de guêtres ergonomiques connectées pour la prévention des risques locomoteurs liés à l'activité sportive chez le cheval grâce à l'apport de la biomécanique.* Université de Technologie de Compiègne.

Sapone, M., Martin, P., Ben Mansour, K., Château, H., & Marin, F. (2020). Comparison of Trotting Stance Detection Methods from an Inertial Measurement Unit Mounted on the Horse's Limb. *Sensors*, 20(10), 2983. <https://doi.org/10.3390/s20102983>

Sapone, M., Martin, P., Ben Mansour, K., Chateau, H., & Marin, F. (2021). The Protraction and Retraction Angles of Horse Limbs: An Estimation during Trotting Using Inertial Sensors. *Sensors*, 21(11), 3792. <https://doi.org/10.3390/s21113792>

Saporta, G. (2008). *Probabilités, analyse des données et statistique* (2e éd.). Editions Technip.

Scheidegger, M. D., Gerber, V., Dolf, G., Burger, D., Flammer, S. A., & Ramseyer, A. (2022). Quantitative Gait Analysis Before and After a Cross-country Test in a Population of Elite Eventing Horses. *Journal of Equine Veterinary Science*, 117, 104077. <https://doi.org/10.1016/j.jevs.2022.104077>

Schumacher, J., Schumacher, J., Graves, F. D., Schramme, M., Smith, R., Coker, M., & Steiger, R. (2001). A comparison of the effects of local analgesic solution in the navicular bursa

of horses with lameness caused by solar toe or solar heel pain. *Equine Veterinary Journal*, 33(4), 386-389. <https://doi.org/10.2746/042516401776249543>

Scoggin, C., & Ross, C. M. (2021). *Proceedings of the 67th Annual Convention of the American Association of Equine Practitioners*. 67.

Sepulveda Caviedes, M. F., Forbes, B. S., & Pfau, T. (2018). Repeatability of gait analysis measurements in Thoroughbreds in training. *Equine Veterinary Journal*, 50(4), 513-518. <https://doi.org/10.1111/evj.12802>

Serra Bragança, F. M., Broomé, S., Rhodin, M., Björnsdóttir, S., Gunnarsson, V., Voskamp, J. P., Persson-Sjodin, E., Back, W., Lindgren, G., Novoa-Bravo, M., Gmel, A. I., Roepstorff, C., van der Zwaag, B. J., Van Weeren, P. R., & Hernlund, E. (2020). Improving gait classification in horses by using inertial measurement unit (IMU) generated data and machine learning. *Scientific Reports*, 10(1), 17785. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-73215-9>

Serra Bragança, F. M., Rhodin, M., & van Weeren, P. R. (2018). On the brink of daily clinical application of objective gait analysis : What evidence do we have so far from studies using an induced lameness model? *The Veterinary Journal*, 234, 11-23. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2018.01.006>

Serra Bragança, F. M., Rhodin, M., Wiestner, T., Hernlund, E., Pfau, T., van Weeren, P. R., & Weishaupt, M. A. (2018). Quantification of the effect of instrumentation error in objective gait assessment in the horse on hindlimb symmetry parameters. *Equine Veterinary Journal*, 50(3), 370-376. <https://doi.org/10.1111/evj.12766>

Serra Bragança, F. M., Roepstorff, C., Rhodin, M., Pfau, T., van Weeren, P. R., & Roepstorff, L. (2020). Quantitative lameness assessment in the horse based on upper body movement symmetry : The effect of different filtering techniques on the quantification of motion symmetry. *Biomedical Signal Processing and Control*, 57, 101674. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2019.101674>

Shrout, P. E., & Fleiss, J. L. (1979). Intraclass correlations : Uses in assessing rater reliability. *Psychological Bulletin*, 86(2), 420-428. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.86.2.420>

Starke, S. D., & May, S. A. (2017). Veterinary student competence in equine lameness recognition and assessment : A mixed methods study. *Veterinary Record*, 181(7), 168-168. <https://doi.org/10.1136/vr.104245>

Starke, S. D., & May, S. A. (2022a). Expert visual assessment strategies for equine lameness examinations in a straight line and circle: A mixed methods study using eye tracking. *Veterinary Record*, 191(8), e1684. <https://doi.org/10.1002/vetr.1684>

Starke, S. D., & May, S. A. (2022b). Robustness of five different visual assessment methods for the evaluation of hindlimb lameness based on tubera coxarum movement in horses at the trot on a straight line. *Equine Veterinary Journal*, 54(6), 1103-1113. <https://doi.org/10.1111/evj.13531>

Starke, S. D., Miles, G. C., Channon, S. B., & May, S. A. (2021). Effect of gamified perceptual learning on visual detection and discrimination skills in equine gait assessment. *Veterinary Record*, 188(10). <https://doi.org/10.1002/vetr.21>

Starke, S. D., & Oosterlinck, M. (2019). Reliability of equine visual lameness classification as a function of expertise, lameness severity and rater confidence. *Veterinary Record*, 184(2), 63-63. <https://doi.org/10.1136/vr.105058>

Starke, S. D., Raistrick, K. J., May, S. A., & Pfau, T. (2013). The effect of trotting speed on the evaluation of subtle lameness in horses. *The Veterinary Journal*, 197(2), 245-252. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2013.03.006>

Starke, S. D., Willems, E., Head, M., May, S. A., & Pfau, T. (2012). Proximal hindlimb flexion in the horse: Effect on movement symmetry and implications for defining soundness: Proximal hindlimb flexion. *Equine Veterinary Journal*, 44(6), 657-663. <https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.2012.00576.x>

Starke, S. D., Willems, E., May, S. A., & Pfau, T. (2012). Vertical head and trunk movement adaptations of sound horses trotting in a circle on a hard surface. *The Veterinary Journal*, 193(1), 73-80. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2011.10.019>

Timmerman, I., Macaire, C., Hanne-Poujade, S., Bertoni, L., Martin, P., Marin, F., & Chateau, H. (2022). A Pilot Study on the Inter-Operator Reproducibility of a Wireless Sensors-Based System for Quantifying Gait Asymmetries in Horses. *Sensors*, 22(23), 9533. <https://doi.org/10.3390/s22239533>

Uhlir, C., Licka, T., Kübber, P., Peham, C., Scheidl, M., & Girtler, D. (1997). Compensatory movements of horses with a stance phase lameness. *Equine Veterinary Journal*, 29(S23), 102-105. <https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.1997.tb05065.x>

Van Den Bogert, A. J., Schamhardt, H. C., & Crowe, A. (1989). Simulation of quadrupedal locomotion using a rigid body model. *Journal of Biomechanics*, 22(1), 33-41. [https://doi.org/10.1016/0021-9290\(89\)90182-6](https://doi.org/10.1016/0021-9290(89)90182-6)

Warner, S. M., Koch, T. O., & Pfau, T. (2010). Inertial sensors for assessment of back movement in horses during locomotion over ground: Inertial sensors for back movement. *Equine Veterinary Journal*, 42, 417-424. <https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.2010.00200.x>

Weeren, P. R., Pfau, T., Rhodin, M., Roepstorff, L., Serra Bragança, F., & Weishaupt, M. A. (2017). Do we have to redefine lameness in the era of quantitative gait analysis? *Equine Veterinary Journal*, 49(5), 567-569. <https://doi.org/10.1111/evj.12715>

Weeren, P. R., Pfau, T., Rhodin, M., Roepstorff, L., Serra Bragança, F., & Weishaupt, M. A. (2018). What is lameness and what (or who) is the gold standard to detect it? *Equine Veterinary Journal*, 50(5), 549-551. <https://doi.org/10.1111/evj.12970>

Weishaupt, M. A. (2004). Compensatory mechanisms of weightbearing lameness in horses: A novel approach by measuring vertical ground reaction forces on an instrumented treadmill. *Vetsuisse-Faculty University of Zurich*.

Weishaupt, M. A. (2008). Adaptation Strategies of Horses with Lameness. *Veterinary Clinics of North America: Equine Practice*, 24(1), 79-100. <https://doi.org/10.1016/j.cveq.2007.11.010>

Weishaupt, M. A., Schatzmann, U., & Straub, R. (1993). Quantifizierung der Stützbeinlahmheit mit Hilfe akzelerometrischer Messungen am Kopf des Pferdes. *Pferdeheilkunde*, 9(6), 375-377.

Weishaupt, M. A., Wiestner, T., Hogg, H. P., Jordan, P., Auer, J. A., & Barrey, E. (2001). Assessment of gait irregularities in the horse: Eye vs. gait analysis. *Equine Veterinary Journal*, 33(S33), 135-140. <https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.2001.tb05376.x>

Werner, H. W. (2012). Prepurchase Examination in Ambulatory Equine Practice. *Veterinary Clinics of North America: Equine Practice*, 28(1), 207-247. <https://doi.org/10.1016/j.cveq.2012.03.001>

Witte, T. H., Knill, K., & Wilson, A. M. (2004). Determination of peak vertical ground reaction force from duty factor in the horse (*Equus caballus*). *Journal of Experimental Biology*, 207(21), 3639-3648. <https://doi.org/10.1242/jeb.01182>

Zetterberg, E., Leclercq, A., Persson-Sjodin, E., Lundblad, J., Haubro Andersen, P., Hernlund, E., & Rhodin, M. (2023). Prevalence of vertical movement asymmetries at trot in Standardbred and Swedish Warmblood foals. *PLOS ONE*, 18(4), e0284105. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0284105>

Annexes

Annexe 1 A pilot study on the inter-operator reproducibility of a wireless sensors-based system for quantifying gait asymmetries in horses

Annexe 2 Movement asymmetry measured in sound horses trotting on a straight line

Annexe 3 Investigation of thresholds for asymmetry indices to represent the visual assessment of single limb lameness by expert veterinarians on horses trotting in a straight line

Annexe 4 Asymmetry Thresholds Representing the Visual Assessment of Forelimb Lameness by Expert Veterinarians on Horses Trotting in circles

Annexe 5 Exploration of asymmetry thresholds to characterise hindlimb lameness on the circle

Article

A Pilot Study on the Inter-Operator Reproducibility of a Wireless Sensors-Based System for Quantifying Gait Asymmetries in Horses

Iris Timmerman ¹, Claire Macaire ^{1,2,3} , Sandrine Hanne-Poujade ², Lélia Bertoni ¹ , Pauline Martin ², Frédéric Marin ³  and Henry Chateau ^{1,*} 

¹ Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort, USC INRAE-ENVA 957 BPLC, CIRALE, 94700 Maisons-Alfort, France

² LIM France, Labcom LIM-ENVA, 24300 Nontron, France

³ Laboratoire de BioMécanique et BioIngénierie (UMR CNRS 7338), Centre of Excellence for Human and Animal Movement Biomechanics (CoEMoB), Université de Technologie de Compiègne (UTC), Alliance Sorbonne Université, 60200 Compiègne, France

* Correspondence: henry.chateau@vet-alfort.fr

Abstract: Repeatability and reproducibility of any measuring system must be evaluated to assess possible limitations for its use. The objective of this study was to establish the repeatability and the inter-operator reproducibility of a sensors-based system (EQUISYM[®]) for quantifying gait asymmetries in horses.. Seven wireless IMUs were placed on the head, the withers, the pelvis, and the 4 cannon bones on three horses, by four different operators, four times on each horse, which led to a total of 48 repetitions randomly assigned. Data were collected along three consecutive days and analysed to calculate total variance, standard deviation and the variance attributable to the operator on multiple asymmetry variables. Maximal percentage of variance due to the operator (calculated out of the total variance) was 5.3% and was related to the sensor placed on the head. The results suggest a good reproducibility of IMU-based gait analysis systems for different operators repositioning the system and repeating the same measurements at a succession of time intervals. Future studies will be useful to confirm that inter-operator reproducibility remains valid in larger groups and on horses with different degrees of locomotor asymmetry.

Keywords: horse; locomotion; gait analysis; repeatability; reproducibility; inertial measurement units



Citation: Timmerman, I.; Macaire, C.; Hanne-Poujade, S.; Bertoni, L.; Martin, P.; Marin, F.; Chateau, H. A Pilot Study on the Inter-Operator Reproducibility of a Wireless Sensors-Based System for Quantifying Gait Asymmetries in Horses. *Sensors* **2022**, *22*, 9533. <https://doi.org/10.3390/s22239533>

Academic Editors: Jeffrey M. Hausdorff, Helena Grip and Fredrik Öhberg

Received: 30 September 2022

Accepted: 1 December 2022

Published: 6 December 2022

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Locomotor diseases associated with lameness are among the most frequent disorders affecting horses. Hence, they represent a major part of the working time and incomes of equine veterinarians [1,2]. Even for the most experienced veterinarians, the evaluation of lameness remains subjective and the diagnosis complicated [3–5]. Subjectivity increases when the lameness is slight [6], and some bias in the evaluation makes the repeatability of the visual examination questionable, as with the expectation of improvement after nerve block [7].

The will to move towards a more objective evaluation allowed the rise of several tools for gait analysis. Stationary force plate and Motion Capture are the most precise and accurate methods, but they cannot be used in current practice, in the field [8]. The needs of veterinary practitioners are for a portable, trustworthy, fast and easy tool to use in the field. Inertial Measurement Units (IMUs) appear then as the most suitable alternative [9].

For instance, EQUISYM[®] is a tool designed to assist veterinarians in the daily clinical diagnosis of locomotor disorders in horses. It provides quantified locomotion data and guides the diagnosis of lameness with objective indicators based on the calculation of asymmetries between left and right limbs during locomotion at the trot. In this context, the system can be used by different veterinarians at different times. In order to be able

to compare results with each other, to ensure long-term locomotor monitoring or to carry out multi-centre studies, it is necessary to verify that the system is capable of giving an equivalent measurement regardless of the operator using it, including novices.

For this purpose, the repeatability and reproducibility of the system, among other factors, must be assessed. The repeatability condition of measurement is defined as “condition of measurement, out of a set of conditions that includes the same measurement procedure, same operators, same measuring system, same operating conditions and same location, and replicate measurements on the same or similar objects over a short period of time” and the reproducibility condition of measurement as “condition of measurement, out of a set of conditions that includes different locations, operators, measuring systems, and replicate measurements on the same or similar objects” [10].

IMUs-based systems for quantifying lameness in horses have been assessed by showing the correlation or the concordance with Motion Capture systems used as a gold standard [11–15]. However, few studies aimed to assay the repeatability of the measurements. For instance, Keegan and al. studied an IMUs-based system repeatability in an uncontrolled environment on 236 horses [16]. After instrumentation of each horse, they were trotted twice at five minutes’ intervals in a straight line, in various places and surface conditions. Another study aimed to determine repeatability of gait variables such as the symmetry of several segments (metacarpal and metatarsal region, hind limb asymmetry . . .) and joint range of motion in the sagittal and coronal planes, during trotting under a controlled treadmill exercise [17]. In this study, ten non-lame horses were instrumented and then trotted three times a day, three days a week, over a three-week period. The repeatability was considered as high for most of the variables. A third study evaluated the influence of biological variations over time by trotting fourteen thoroughbred horses in a straight line once a day for five consecutive days, and then once a week for five consecutive weeks while horses were in race training [18]. Daily and weekly repeatability was lower than in the previous study [17]. Mainly, horses were of varying training and movement asymmetry levels and it was not possible to dissociate the effects of the sensors placement from the biological variability. None of these studies have evaluated the inter-operator reproducibility. To the best of our knowledge, it has not been studied yet.

In this context, the goal of our study was to focus on the effect of IMUs placement by different operators in order to assess reproducibility and to verify that the system can be used reliably regardless of the user’s level of expertise, under all the conditions of the locomotor examination (straight line and circles).

The objective of our study was then to evaluate the repeatability and the inter-operator reproducibility of a gait analysis system, EQUISYM[®], in a standardised environment, on a straight line and in circles, with different users. It was hypothesised that the variance attributed to the operator is negligible compared to the total variance.

2. Materials and Methods

2.1. Horses

Three trotters from the Centre d’Imagerie et de Recherche sur les Affections Locomotrices Equines (CIRALE) were included: a 13 years old gelding, a 14 years old mare and a 27 years old gelding. These three horses were not on any training beyond the experiment and no subjective gait change was noticed over the three days of experiment.

2.2. Instrumentation

Horses were equipped with EQUISYM[®], composed of 7 wireless IMUs (tri-axial accelerometer $\pm 16 \times$ gravity, tri-axial gyroscope ± 2000 deg/s) placed on the head, the withers, the pelvis, and the 4 cannon bones (Figure 1). They recorded at 200 Hz during a minimum of 20 trot strides on straight line and in circles.



Figure 1. Horse equipped with EQUISYM[®] system, composed by sensors placed on the head, the withers, the pelvis and the 4 cannon bones (indicated by red arrows).

2.3. Protocol

The facilities were composed of a straight line of 30 m and a circle of 14 m in diameter. Four different operators were selected: two of them had never placed the sensors before, whereas the other two operators were used to doing it. A demonstration was given for the operators who had never placed it before the experiment. Each operator placed the sensors four times on each horse along three consecutive days, which led to a total of 48 repetitions randomly assigned. To avoid the habituation effect, each operator waited at least one hour between two consecutive positionings. When the measurement system was placed, the horse was trotted in-hand on a hard surface, firstly in a left rein circle, then in a right rein circle and finally in a straight line. The protocol was intended to mimic the standardised conditions of a locomotor examination. The mean \pm standard deviation (SD) of the recorded strides was distributed as following: 29.5 \pm 5.5 strides on straight line, 32.1 \pm 9.5 on right rein circle, 36.5 \pm 9.4 on left rein circle.

The handler was the same person during the three days of the experiment. Each horse performed a maximum of three successive repetitions in order to limit the influence of fatigue. Between two sessions of three repetitions, each horse had a minimum break of one hour.

2.4. Data Processing

Data were analysed using custom-written Matlab2020a (The MathWorks, Natick, MA, USA) scripts. Stance sequences were selected based on sequences of the cannon bones gyroscopic signal. Foot-on and foot-off were determined from cannon bones IMUs' signals thanks to the method developed by Hattrisse and al. [19]. The dorso-ventral acceleration signal was integrated twice to obtain displacement values, and was high-pass filtered using a fourth-order Butterworth filter with a cut-off frequency set to 1 Hz. The choice of this cut-off frequency was made after checking that the high-pass filter suppresses the slow drift but does not distort the shape of the signal, following the recommendations of Serra Bragança et al. [20]. Vertical displacements of the head, withers and pelvis were segmented into strides. One stride was defined as the time between two consecutive foot-on of the left forelimb.

From the vertical displacement of the head (-H), withers (-W) and pelvis (-P) occurring along a stride, 4 variables were calculated for each sensor location. The following Asymmetry Indexes (AI), expressed as percentage of the maximal range of motion within a stride, were used to compare left vs. right part of the stride [21]: AI-Min was the left-right difference of the lowest altitude point; AI-Max was the left-right difference of the highest altitude point, AI-up was the left-right difference of the upward range of motion during the propulsion phase, AI-down was the left-right difference of the downward range of motion during the damping phase, and AI-stance-duration was the left-right difference of the duration of the stance phase. Positive AI value indicated a weaker movement amplitude or a shorter stance phase duration (AI-stance-duration) during the right stance than during the left stance, and negative AI value indicated the opposite.

2.5. Statistical Analysis

To evaluate the repeatability and the inter-operator reproducibility, for each AI presented above and each condition (i.e., straight line, left and right rein circle), the total variance, as well as the corresponding SD, and the variance attributable to the operator were calculated. To do this, a model of analysis of variance was computed with operators and horses as random effects [22]. As the rank of repetition and the experience of the operator could also be a source of variation, the model was adjusted on these two factors as fixed effects. The statistical analysis was performed with the RStudio software 4.0.3 (RStudio Inc., Boston, MA, USA).

3. Results

Straight line results are shown in Table 1 and Figure S1. In a straight line, the total variance was the highest for the index AI-Up-H (723.3) and the lowest for AI-Stance-Duration-HIND (11.1). Total variance and SD were higher for head-related AIs than for the withers or pelvis. The SD ranged between 18.6% and 26.9% for head-related AIs, and between 3.3% and 14.2% for pelvis and withers-related AIs. For all indexes, the percentage of variance attributable to the operator was close to 0, with a maximum value of 2.1% for AI-Stance-Duration-FRONT.

Table 1. Total variance, total standard deviation and percentage of variance due to the operators (calculated out of the total variance) for four asymmetry indexes (AI -Up, -Down, -Max and -Min) calculated on the head (H), the withers (W) and the pelvis (P) for 48 repeated measurements (4 operators, 3 horses, 4 repetitions) performed on a straight line.

AI	Total Variance	Total Standard Deviation	Percentage of Variance Due to the Operators (%)
AI-Up-H (%)	723.3	26.9	0.0
AI-Down-H (%)	683.0	26.1	0.0
AI-Max-H (%)	346.1	18.6	0.5
AI-Min-H (%)	506.3	22.5	0.0
AI-Up-W (%)	35.6	6.0	0.7
AI-Down-W (%)	119.0	10.9	0.0
AI-Max-W (%)	53.8	7.3	1.1
AI-Min-W (%)	39.9	6.3	0.0
AI-Stance-Duration-FRONT (%)	57.4	7.6	2.1
AI-Up-P (%)	97.4	9.9	0.6
AI-Down-P (%)	202.4	14.2	0.0
AI-Max-P (%)	89.2	9.4	0.4
AI-Min-P (%)	90.0	9.5	0.1
AI-Stance-Duration-HIND (%)	11.1	3.3	0.0

Left rein circle results and right rein circle results are presented in Table 2 and Figures S2 and S3. In both left and right rein circles, total variance was maximum for AI-Up-H (respectively 1448.2 and 2089.4), and minimum for AI-Stance-Duration-FRONT

(respectively 18.1 and 36.7). As in a straight line, the total variance and SD were higher for head-related AIs. The SD varied in a similar range of values, respectively between 15.0% and 38.1% in the left rein circle and between 13.5% and 45.7% in the right rein circle for head-related AIs, and between 4.2% and 26.2% in the left rein circle and between 6.3% and 31.3% in the right rein circle for pelvis and withers-related AIs. AI-Down was systematically associated with a larger variance than the other AIs calculated for the withers and the pelvis.

Table 2. Total variance, total standard deviation and percentage of variance due to the operators (calculated out of the total) for four asymmetry indexes (AI -Up, -Down, -Max and -Min) calculated on the head (H), the withers (W) and the pelvis (P) for 48 repeated measurements (4 operators, 3 horses, 4 repetitions) performed on right and left rein circle.

AI	Left Rein Circle			Right Rein Circle		
	Total Variance	Total Standard Deviation	Percentage of Variance Due to the Operators (%)	Total Variance	Total Standard Deviation	Percentage of Variance Due to the Operators (%)
AI-Up-H (%)	1448.2	38.1	0.5	2089.4	45.7	4.2
AI-Down-H (%)	521.0	22.8	0.0	963.1	31.0	0.0
AI-Max-H (%)	224.2	15.0	0.5	182.6	13.5	5.3
AI-Min-H (%)	765.0	27.7	0.0	1314.9	36.3	2.8
AI-Up-W (%)	111.2	10.5	3.6	403.6	20.1	0.0
AI-Down-W (%)	179.6	13.4	0.0	513.7	22.7	1.2
AI-Max-W (%)	102.2	10.1	1.0	97.9	9.9	0.0
AI-Min-W (%)	69.0	8.3	0.0	548.8	23.4	0.0
AI-Stance-Duration-FRONT (%)	18.1	4.2	1.0	115.5	10.7	0.0
AI-Up-P (%)	254.4	15.9	0.0	981.6	31.3	0.0
AI-Down-P (%)	687.7	26.2	0.0	124.5	11.2	0.0
AI-Max-P (%)	174.7	13.2	0.0	226.5	15.0	0.0
AI-Min-P (%)	397.9	19.9	0.0	334.7	18.3	0.4
AI-Stance-Duration-HIND (%)	18.4	4.3	4.6	36.7	6.1	0.0

Similar to the straight line, the variance attributable to the operator in the circle was close to zero for most of the AIs and reached a maximum of 4.6% of the total variance for AI-Stance-Duration-HIND in the left rein circle, and a maximum of 5.3% of the total variance for AI-Max-H in the right rein circle.

4. Discussion

The purpose of this study was to evaluate repeatability and reproducibility between operators of an IMU-based gait analysis system used to quantify asymmetry indexes in horses trotting in a straight line and circles under the same circumstances as a standard locomotor clinical exam. In our study, the variance attributable to the operator was very low, which tends to validate our starting hypothesis: the asymmetry indexes are repeatable when one or several operators set up the sensors several times, when the horse trots on a hard surface, in a straight line or in a circle.

In this study, the variance attributable to the operators was slightly higher on a right rein circle, for head-related indexes (up to 5.3% of total variance). No obvious explanation can be attributed to this observation except than that the effect of a small misplacement of the sensors by the operator may have been slightly higher on the circle than for the straight line.

As slight biological variations may be clinically relevant and many operators may be required to use the system, including those with little training, assessing reproducibility is essential to enable comparison of results obtained at different times, by different operators. Our results show that on the 42 asymmetry indexes measured (14 in a straight line, 14 in a left hand circle and 14 in a right hand circle), the variance attributable to the operator counted for less than 1% of the total variance in 81% of cases. For each exercise, the head-related indexes showed the highest SD (between 13.5% and 45.7%). In contrast, the withers-related variables showed the lowest SD (between 4.2% and 23.4%). The index AI-Down was associated with a larger variance than the other AIs for the withers and for the pelvis, indicating a higher variability of this index and thus a more complex interpretation.

Observed values for SD for the straight line were close to the values calculated from a group of 49 sound horses with the same system [21]. SD values for the left and right rein circles were slightly higher. It has been shown that moving in circles induces a movement asymmetry which depends on speed and circle radius [23]. In our experiment none of these factors were strictly controlled, knowing that we wanted to remain in the same conditions as the standard clinical examination. This could explain the increased SD in circles, with a higher level of freedom, enabling the horse to change its body direction and speed [23,24]. It is also known that asymmetry on a circle is physiologically higher than in a straight line.

Total variance was higher for head related indexes than for the withers and pelvis, for the straight line and circles. Similar results have been found in previous experiments, in which head variability was higher than pelvis and withers variability [18,24]. This is probably due to a wider degree of freedom for the head, resulting in multiple head movements caused by external stimuli such as other horses passing by, or noises. These uncontrolled head movements during some of our experiments are likely to explain the increase in total variance for indexes related to the head. This result supports the use of a sensor on the withers, which presents a much lower variability when exploring forelimb lameness.

After adjustment of our statistical model on the level of expertise of the operator and on the rank of repetition, nothing indicates that one of them had a significant effect. Hence, no confounding could have been made between the level of expertise of the operator and the variability induced by the operators.

The area of the experiment was fixed in our study, and our hypotheses were tested only on a hard surface. A similar study should be done on a soft surface to extrapolate our findings. The reproducibility should also be studied in different places. Furthermore, asymmetry of the included horses has been considered steady during the three days of the experiment but it is obvious that the total variance measured depends not only on the measurement system but also on the inevitable biological variation of the locomotor asymmetry, whether physiological or pathological.

To date, no study had been conducted to measure the inter-operator reproducibility of IMU's to evaluate gait asymmetry in horses. Our study provides initial evidence that this type of system can be used by different operators, including novices, without major disruption to the measurement collection. It also confirms that the variability of the measurements is higher for the head-related indexes than for the withers and pelvis related indexes. The sample size (number of horses and operators) remains a limitation of this study. Ideally, future studies should be conducted to verify that inter-operator reproducibility remains valid in larger groups and on horses with different degrees of locomotor asymmetry.

Supplementary Materials: The following supporting information can be downloaded at: <https://www.mdpi.com/article/10.3390/s22239533/s1>, Figure S1: Asymmetry indexes (mean and SD) measured on the head (-H), the withers (-W) and the pelvis (-P) of three horses trotting **on a straight line** by four operators (operator A: red dot, operator B: blue dot, operator C: green dot and operator D: magenta dot) repeating 12 times the measurements for each horse, after systematically repositioning the sensors at each recording. Figure S2: Asymmetry indexes (mean and SD) measured on the head (-H), the withers (-W) and the pelvis (-P) of three horses trotting **on a left rein circle** by four operators (operator A: red dot, operator B: blue dot, operator C: green dot and operator D: magenta dot) repeating 12 times the measurements for each horse, after systematically repositioning the sensors at each recording. Figure S3: Asymmetry indexes (mean and SD) measured on the head (-H), the withers (-W) and the pelvis (-P) of three horses trotting **on a right rein circle** by four operators (operator A: red dot, operator B: blue dot, operator C: green dot and operator D: magenta dot) repeating 12 times the measurements for each horse, after systematically repositioning the sensors at each recording.

Author Contributions: Conceptualization, I.T., C.M., S.H.-P. and H.C.; methodology, I.T., C.M., S.H.-P. and H.C.; software, C.M. and S.H.-P.; validation, L.B., P.M. and F.M.; formal analysis, S.H.-P.; investigation, I.T., C.M.; resources, L.B.; data curation, I.T., C.M.; writing—original draft preparation, I.T.; writing—review and editing, C.M., S.H.-P. and H.C.; supervision, S.H.-P., H.C., P.M. and F.M.; project administration, H.C.; funding acquisition, H.C., P.M. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: The authors thank the Agence Nationale de la Recherche for the funding of the LabCom “CWD-Vetlab” (Contract ANR 16-LCV2-0002-01) and the European Union (FEDER) and the Region Normandie for funding of the project “EQUISYM” (Contract 20E01636).

Institutional Review Board Statement: The animal study protocol was approved by the Ethics Committee of COMITE D’ETHIQUE EN RECHERCHE CLINIQUE—ComERC (n°2022-01-19).

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: The data that support the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

Acknowledgments: The authors thank the Centre d’Imagerie et de Recherche sur les Affections Locomotrices Equines (CIRALE).

Conflicts of Interest: The project was supported by the Agence Nationale de la Recherche (ANR) which sponsors collaborative projects between a company (LIM France) and the Ecole Nationale Vétérinaire d’Alfort (ENVA). LIM France owns and markets the EQUISYMND brand.

References

- Loomans, J.B.A. *The Equine Veterinarian: Past, Present and Prospects of a Profession*; Utrecht University: Utrecht, The Netherlands, 2008; ISBN 978-90-393-4927-4.
- Nielsen, T.D.; Dean, R.S.; Robinson, N.J.; Massey, A.; Brennan, M.L. Survey of the UK Veterinary Profession: Common Species and Conditions Nominated by Veterinarians in Practice. *Vet. Rec.* **2014**, *174*, 324. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- Fuller, C.J.; Bladon, B.M.; Driver, A.J.; Barr, A.R.S. The Intra- and Inter-Assessor Reliability of Measurement of Functional Outcome by Lameness Scoring in Horses. *Vet. J.* **2006**, *171*, 281–286. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- Mitchell, J.S. Lameness and Performance Evaluation in Ambulatory Practice. *Vet. Clin. N. Am. Equine Pract.* **2012**, *28*, 101–115. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- Hammarberg, M.; Egenvall, A.; Pfau, T.; Rhodin, M. Rater Agreement of Visual Lameness Assessment in Horses during Lungeing. *Equine. Vet. J.* **2016**, *48*, 78–82. [[CrossRef](#)]
- Keegan, K.G.; Dent, E.V.; Wilson, D.A.; Janicek, J.; Kramer, J.; Lacarrubba, A.; Walsh, D.M.; Cassells, M.W.; Esther, T.M.; Schiltz, P.; et al. Repeatability of Subjective Evaluation of Lameness in Horses: Repeatability of Subjective Evaluation of Lameness in Horses. *Equine Vet. J.* **2010**, *42*, 92–97. [[CrossRef](#)]
- Arkell, M.; Archer, R.M.; Guitian, F.J.; May, S.A. Evidence of Bias Affecting the Interpretation of the Results of Local Anaesthetic Nerve Blocks When Assessing Lameness in Horses. *Vet. Rec.* **2006**, *159*, 346–348. [[CrossRef](#)]
- Serra Bragança, F.M.; Rhodin, M.; van Weeren, P.R. On the Brink of Daily Clinical Application of Objective Gait Analysis: What Evidence Do We Have So Far from Studies Using an Induced Lameness Model? *Vet. J.* **2018**, *234*, 11–23. [[CrossRef](#)]
- McCracken, M.J.; Kramer, J.; Keegan, K.G.; Lopes, M.; Wilson, D.A.; Reed, S.K.; LaCarrubba, A.; Rasch, M. Comparison of an Inertial Sensor System of Lameness Quantification with Subjective Lameness Evaluation: Comparison of Inertial System with Subjective Lameness Evaluation. *Equine Vet. J.* **2012**, *44*, 652–656. [[CrossRef](#)]
- Balazs, A. International Vocabulary of Metrology—Basic and General Concepts and Associated Terms. *Chem. Int.-Newsmag. IUPAC* **2008**, *30*, 21–22. [[CrossRef](#)]
- Keegan, K.G.; Yonezawa, Y.; Pai, P.F.; Wilson, D.A.; Kramer, J. Evaluation of a Sensor-Based System of Motion Analysis for Detection and Quantification of Forelimb and Hind Limb Lameness in Horses. *Am. J. Vet. Res.* **2004**, *65*, 665–670. [[CrossRef](#)]
- Pfau, T.; Witte, T.H.; Wilson, A.M. A Method for Deriving Displacement Data during Cyclical Movement Using an Inertial Sensor. *J. Exp. Biol.* **2005**, *208*, 2503–2514. [[CrossRef](#)]
- Martin, P.; Chateau, H.; Pourcelot, P.; Duray, L.; Cheze, L. Comparison Between Inertial Sensors and Motion Capture System to Quantify Flexion-Extension Motion in the Back of a Horse. *Equine Vet. J.* **2014**, *46*, 43. [[CrossRef](#)]
- Bosch, S.; Serra Bragança, F.; Marin-Perianu, M.; Marin-Perianu, R.; van der Zwaag, B.; Voskamp, J.; Back, W.; van Weeren, R.; Havinga, P. EquiMoves: A Wireless Networked Inertial Measurement System for Objective Examination of Horse Gait. *Sensors* **2018**, *18*, 850. [[CrossRef](#)]
- Sapone, M.; Martin, P.; Ben Mansour, K.; Chateau, H.; Marin, F. Comparison of Trotting Stance Detection Methods from an Inertial Measurement Unit Mounted on the Horse’s Limb. *Sensors* **2020**, *20*, 2983. [[CrossRef](#)]

16. Keegan, K.G.; Kramer, J.; Yonezawa, Y.; Maki, H.; Pai, P.F.; Dent, E.V.; Kellerman, T.E.; Wilson, D.A.; Reed, S.K. Assessment of Repeatability of a Wireless, Inertial Sensor–Based Lameness Evaluation System for Horses. *Am. J. Vet. Res.* **2011**, *72*, 1156–1163. [[CrossRef](#)]
17. Cruz, A.M.; Maninchedda, U.E.; Burger, D.; Wanda, S.; Vidondo, B. Repeatability of Gait Pattern Variables Measured by Use of Extremity-Mounted Inertial Measurement Units in Nonlame Horses during Trotting. *Am. J. Vet. Res.* **2017**, *78*, 1011–1018. [[CrossRef](#)]
18. Caviedes, M.F.S.; Forbes, B.S.; Pfau, T. Repeatability of Gait Analysis Measurements in Thoroughbreds in Training. *Equine Vet. J.* **2018**, *50*, 513–518. [[CrossRef](#)]
19. Hatrisse, C.; Macaire, C.; Sapone, M.; Hebert, C.; Hanne-Poujade, S.; De Azevedo, E.; Marin, F.; Martin, P.; Chateau, H. Stance Phase Detection by Inertial Measurement Unit Placed on the Metacarpus of Horses Trotting on Hard and Soft Straight Lines and Circles. *Sensors* **2022**, *22*, 703. [[CrossRef](#)]
20. Bragança, F.S.; Roepstorff, C.; Rhodin, M.; Pfau, T.; van Weeren, P.R.; Roepstorff, L. Quantitative lameness assessment in the horse based on upper body movement symmetry: The effect of different filtering techniques on the quantification of motion symmetry. *Biomed. Signal Process. Control.* **2020**, *57*, 101674. [[CrossRef](#)]
21. Macaire, C.; Hanne-Poujade, S.; De Azevedo, E.; Hatrisse, C.; Hébert, C.; Martin, P.; Marin, F.; Chateau, H. Movement Asymmetry Measured in Sound Horses Trotting on a Straight Line. in Abstracts 47th congress of the Society of Biomechanics. *Comput. Methods Biomech. Biomed. Eng.* **2022**, *25*, S194–S195. [[CrossRef](#)]
22. Shrout, P.E.; Fleiss, J.L. Intraclass correlations: Uses in assessing rater reliability. *Psychol. Bull.* **1979**, *86*, 420–428. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
23. Pfau, T.; Stubbs, N.C.; Kaiser, L.J.; Brown, L.E.A.; Clayton, H.M. Effect of Trotting Speed and Circle Radius on Movement Symmetry in Horses during Lunging on a Soft Surface. *Am. J. Vet. Res.* **2012**, *73*, 1890–1899. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
24. Hardeman, A.M.; Serra Bragança, F.M.; Swagemakers, J.H.; Weeren, P.R.; Roepstorff, L. Variation in Gait Parameters Used for Objective Lameness Assessment in Sound Horses at the Trot on the Straight Line and the Lunge. *Equine Vet. J.* **2019**, *51*, 831–839. [[CrossRef](#)]



HAL
open science

Movement asymmetry measured in sound horses trotting on a straight line

Claire Macaire, Sandrine Hanne-Poujade, E de Azevedo, Chloé Hatrisse, C Hébert, Pauline Martin, Frédéric Marin, Henri Chateau

► **To cite this version:**

Claire Macaire, Sandrine Hanne-Poujade, E de Azevedo, Chloé Hatrisse, C Hébert, et al.. Movement asymmetry measured in sound horses trotting on a straight line. 47th congress of the Society of Biomechanics, Oct 2022, Monastir, Tunisia. pp.S144- S146, 10.1080/10255842.2022.2116885 . hal-03887134

HAL Id: hal-03887134

<https://hal.science/hal-03887134>

Submitted on 6 Dec 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Movement asymmetry measured in sound horses trotting on a straight line

C. Macaire^{a,b,c}, S. Hanne-Poujade^a,
E. De Azevedo^b, C. Hattrisse^{b,d}, C. Hébert^a,
P. Martin^a, F. Marin^c and H. Chateau^b

^aLIM Group, Nontron, France; ^bÉcole nationale vétérinaire d'Alfort, USC INRAE 957 BPLC, CIRALE, Maisons-Alfort, France; ^cUniversité de Technologie de Compiègne, UMR CNRS 7338 BMBl, Compiègne, France; ^dLaboratoire de Biomécanique et Mécanique des Chocs, Université Claude Bernard Lyon1

1. Introduction

During clinical examination, the veterinarian assesses the horse locomotion at trot in order to detect lameness. Visual observation is used to determine the painful limb and the lameness grade. However this assessment remains subjective with large variation between veterinarians, particularly for subtle lameness (Keegan et al. 2010). To assist in the diagnostic, movement analysis systems have been used increasingly in the veterinary practice. Particularly Inertial Measurement Units (IMU) allow versatile and pervasive protocols, their limit of agreement compared with the Motion Capture is of 9–16 mm (Warner et al. 2010).

Vertical movement of the dorsal line (head, withers and pelvis), which decreases during the stance phase of the painful limb, is often used as biomarker. However, even sound horses able to perform at their maximal capacity demonstrated physiological asymmetrical gait (Kallerud et al. 2021). The definition of lame horse is then controversial (Weeren et al. 2017). Some studies measured asymmetry in a population of sound horses but the number of subjects was relatively small (Hardeman et al. 2019).

The aim of this study was to define the range of asymmetry values which characterizes a population of sound horses.

2. Methods

2.1. Horses

49 horses of various breeds, with an average age of 7.8 (range 2–15) years, were included in the study. These horses were considered by their owner/rider able to perform at their maximal capacity. Their locomotion has been evaluated as asymptomatic by an expert clinician (specialist in equine locomotor pathology) during a complete and standardized clinical

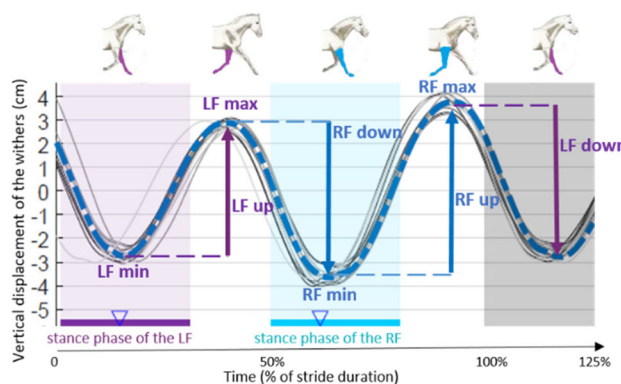


Figure 1. Mean vertical displacement (cm) of the withers plotted against time (% of stride duration) of a horse with a left forelimb (LF) lameness.

Table 1. Mean, SD, median, 5th and 95th percentiles of asymmetry indexes for 49 sound horses.

		Mean (%)	SD (%)	Median (%)	5 th P (%)	95 th P (%)
Head	Al-min	-7	29	-12	-42	46
	Al-max	-4	12	-5	-23	15
	Al-up	-11	29	-11	-52	36
Withers	Al-down	-2	29	-5	-48	52
	Al-min	-3	8	-4	-11	8
	Al-max	2	8	1	-9	15
Pelvis	Al-up	-1	9	-3	-12	16
	Al-down	-3	11	-2	-24	12
	Al-min	6	8	6	-7	20
	Al-max	-1	9	-2	-19	11
	Al-up	5	13	5	-11	25
	Al-down	5	11	5	-14	20

locomotor examination (straight lines and circles, on hard and soft grounds at different gaits).

2.2. Data collection

Each horse was equipped with 7 IMUs placed on the head, withers, pelvis and 4 metacarpal-tarsal bones. Each IMU was composed of triaxial accelerometers and gyroscopes set to a sampling frequency of 200 Hz. Recordings were performed during the locomotor examination when the horse trotted on a straight line on an asphalt surface, held in hand. A mean (min-max) of 14.3 (5–55) trot strides were recorded per horse.

2.3. Data processing

Dorsoventral displacement of the head, withers and pelvis were deduced from accelerometric data (Pfauf et al. 2005) and were normalized by the stride duration. During a normal trot stride, the trunk of the horse moves twice up and down with a double sinusoid corresponding to the right and left stance phases (Figure 1). Based on this principle, four Asymmetry Indexes (AI) were calculated and expressed as a percentage of the maximal range of motion (%).

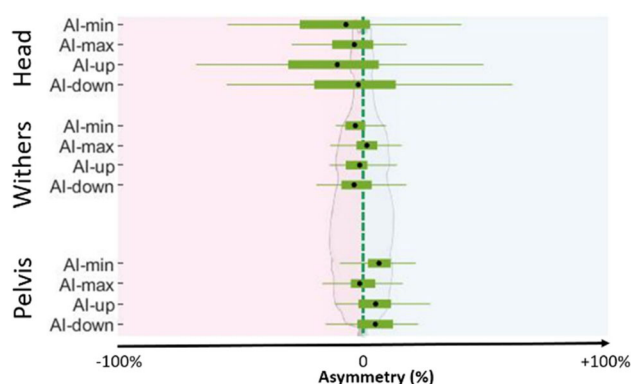


Figure 2. Boxplots (minimum, 2nd, 3rd quartiles and maximum) of asymmetry indexes (AI) of 49 sound horses according to the localization (head, withers and pelvis). Means are represented as black dots.

AI-Min was the left-right difference of the lowest altitude point; AI-Max was the left-right difference of the highest altitude point; AI-up was the left-right difference of the upward range of motion during the propulsion phase; and AI-down was the left-right difference of the downward range of motion during the damping phase. Positive AI value indicates a weaker movement amplitude during the right stance than during the left stance, and negative AI value indicates the opposite.

Mean and median values, standard deviation (SD), 5th (5th P) and 95th (95th P) percentiles were calculated for the 49 sound horses included in this study.

3. Results and discussion

AI of the head showed a higher variability than AI of the withers and pelvis. This result should be analysed in conjunction with greater mobility of the head, which is also affected by parasitic movements inducing artefacts. Moreover head AI means were all slightly negative, which reflected a subtle decreased range of motion of the head during the Left Forelimb (LF) stance phase than during the Right Forelimb (RF) stance phase. In conventional horse training, the leader holds the rope connected to the horse's head, standing systematically to the left side of the horse. This asymmetrical posture of the handler may explain the slight movement reduction of the head during the left stance in sound horses (Table 1, Figure 2).

AI of the withers showed relatively small variability between horses and were close to zero %, meaning that the physiological asymmetry of sound horses on the withers was small.

Finally, AI of the pelvis also showed small variability between horses. AI-up, -down and -min were slightly positive, which reflected a weaker downward

movement during the right hindlimb stance phase than during the left hindlimb stance phase.

4. Conclusions

Sound horses showed slight asymmetries of the vertical movement of the head and pelvis (AI-min means of -7% and 6%), reflecting less movement amplitude during the left forelimb – right hindlimb stance phase. The variability was greater on the head (SD of 29% for AI-min, AI-up and AI-down) than on the withers and pelvis (maximal SD of 13%). It emphasizes the interest of biomarkers related to the trunk rather than to the head which is more affected by artefactual movements. Further studies are now needed to define asymmetry thresholds for discrimination between sound and pathological horses.

Acknowledgements

The authors would like to thank the team of CIRALE, and particularly the veterinary team composed of J.M. Denoix, V. Coudry, S. Jacquet, L. Bertoni, A. Tallaj and the director of CIRALE, F. Audigié.

Disclosure statement

No potential conflict of interest was reported by the authors.

References

- Hardeman AM, Serra Bragança FM, Swagemakers JH, Weeren PR, Roepstorff L. 2019. Variation in gait parameters used for objective lameness assessment in sound horses at the trot on the straight line and the lunge. *Equine Vet J.* 51(6):831–839.
- Kallerud AS, Fjordbakk CT, Hendrickson EHS, Persson-Sjodin E, Hammarberg M, Rhodin M, Hernlund E. 2021. Objectively measured movement asymmetry in yearling Standardbred trotters. *Equine Vet J.* 53(3):590–599.
- Keegan KG, Dent EV, Wilson DA, Janicek J, Kramer J, Lacarrubba A, Walsh DM, Cassells MW, Esther TM, Schiltz P, et al. 2010. Repeatability of subjective evaluation of lameness in horses: repeatability of subjective evaluation of lameness in horses. *Equine Veterin J.* 42(2):92–97.
- Pfau T, Witte TH, Wilson AM. 2005. A method for deriving displacement data during cyclical movement using an inertial sensor. *J Experim Biol.* 208(13):2503–2514.
- Warner SM, Koch TO, Pfau T. 2010. Inertial sensors for assessment of back movement in horses during locomotion over ground: Inertial sensors for back movement. *Equine Vet J.* 42:417–424.
- Weeren PR, Pfau T, Rhodin M, Roepstorff L, Serra Bragança F, Weishaupt MA. 2017. Do we have to redefine lameness in the era of quantitative gait analysis? *Equine Vet J.* 49(5):567–569.

KEYWORDS Horse; kinematic; symmetry; lameness

✉ claire.macaire@vet-alfort.fr



Article

Investigation of Thresholds for Asymmetry Indices to Represent the Visual Assessment of Single Limb Lameness by Expert Veterinarians on Horses Trotting in a Straight Line

Claire Macaire ^{1,2,3,*} , Sandrine Hanne-Poujade ¹, Emeline De Azevedo ², Jean-Marie Denoix ², Virginie Coudry ², Sandrine Jacquet ² , Lélia Bertoni ² , Amélie Tallaj ², Fabrice Audigié ², Chloé Hatrisse ², Camille Hébert ¹, Pauline Martin ¹, Frédéric Marin ³ and Henry Chateau ²

¹ LIM France, Labcom LIM-ENVA, 24300 Nontron, France

² Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort, USC INRAE-ENVA 957 BPLC, CIRALE, 94700 Maisons-Alfort, France

³ Laboratoire de BioMécanique et BioIngénierie (UMR CNRS 7338), Centre of Excellence for Human and Animal Movement Biomechanics (CoEMoB), Université de Technologie de Compiègne (UTC), Alliance Sorbonne Université, 60200 Compiègne, France

* Correspondence: claire.macaire@vet-alfort.fr



Citation: Macaire, C.; Hanne-Poujade, S.; De Azevedo, E.; Denoix, J.-M.; Coudry, V.; Jacquet, S.; Bertoni, L.; Tallaj, A.; Audigié, F.; Hatrisse, C.; et al. Investigation of Thresholds for Asymmetry Indices to Represent the Visual Assessment of Single Limb Lameness by Expert Veterinarians on Horses Trotting in a Straight Line. *Animals* **2022**, *12*, 3498. <https://doi.org/10.3390/ani12243498>

Academic Editors: Hilary Clayton and Lindsay St. George

Received: 3 October 2022

Accepted: 7 December 2022

Published: 11 December 2022

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Simple Summary: Visual gait evaluation made by the equine veterinarian is an essential part of the diagnosis of locomotor disorders. Measurement of movement asymmetry can provide objective support for diagnosis. However, their interpretation remains complex as horses considered to be healthy may show some degree of asymmetry. This study aims to establish and analyze the threshold values for different indices that can be used to discriminate a healthy horse from a horse considered lame by expert clinicians in their daily practice. At least 88% of healthy horses had an upward range of movement of the withers between -10% and 7% of asymmetry. The withers asymmetry of at least 84% of the forelimb lame horses was out of these thresholds. As well, at least 86% of healthy horses had an upward range of movement of the pelvis between -7% and 18% of asymmetry. At least 83% of the hindlimb lame horses were out of these pelvis asymmetry thresholds. Despite the quite low number of horses included in this study (224), these thresholds provide a first help to avoid overinterpretation of asymmetry when using objective gait analysis systems.

Abstract: Defining whether a gait asymmetry should be considered as lameness is challenging. Gait analysis systems now provide relatively accurate objective data, but their interpretation remains complex. Thresholds for discriminating between horses that are visually assessed as being lame or sound, as well as thresholds for locating the lame limb with precise sensitivity and specificity are essential for accurate interpretation of asymmetry measures. The goal of this study was to establish the thresholds of asymmetry indices having the best sensitivity and specificity to represent the visual single-limb lameness assessment made by expert veterinarians as part of their routine practice. Horses included in this study were evaluated for locomotor disorders at a clinic and equipped with the EQUISYM[®] system using inertial measurement unit (IMU) sensors. Visual evaluation by expert clinicians allocated horses into five groups: 49 sound, 62 left forelimb lame, 67 right forelimb lame, 23 left hindlimb lame, and 23 right hindlimb lame horses. 1/10 grade lame horses were excluded. Sensors placed on the head (_H), the withers (_W), and the pelvis (_P) provided vertical displacement. Relative difference of minimal (AI-min) and maximal (AI-max) altitudes, and of upward (AI-up) and downward (AI-down) amplitudes between right and left stance phases were calculated. Receiver operating characteristic (ROC) curves discriminating the sound horses from each lame limb group revealed the threshold of asymmetry indice associated with the best sensitivity and specificity. AI-up_W had the best ability to discriminate forelimb lame horses from sound horses with thresholds (left: -7% ; right: $+10\%$) whose sensitivity was greater than 84% and specificity greater than 88%. AI-up_P and AI-max_P discriminated hindlimb lame horses from sound horses with thresholds (left: -7% ; right: $+18\%$ and left: -10% ; right: $+6\%$) whose sensitivity was greater than 78%, and specificity greater than 82%. Identified thresholds will enable the interpretation of quantitative data

from lameness quantification systems. This study is mainly limited by the number of included horses and deserves further investigation with additional data, and similar studies on circles are warranted.

Keywords: horse; lameness; symmetry; ROC curves; IMU

1. Introduction

Movement asymmetry is commonly used as an indicator of locomotor disorders by horses. Indeed, the aim of locomotor examination is to identify any impairment and to locate its source. Currently, lameness is visually evaluated by veterinarians. However agreement between veterinarians about lameness grade assessment is low, particularly for subtle lameness detection [1,2]. Modern gait analysis tools provide quantitative measures of asymmetry. The most versatile tool, the inertial measurement units (IMUs), can be used in a clinical setting [3,4]. The issue about the relationship between visual lameness assessment and gait asymmetries measurement systems has been raised. Asymmetry of vertical displacement of the head and pelvis has shown relevant increase with induced lameness [5–7]. But even horses perceived by the veterinarian to be sound have demonstrated physiological asymmetrical gait [8–10]. Despite the known capacity of withers asymmetry for detecting compensatory movements, it has been studied relatively less than the head [11,12].

In this context, thresholds of asymmetry parameters which correspond to visual evaluation of lameness by veterinarians have been studied. Asymmetry thresholds of the head (>6 mm) and the pelvic (>3 mm) vertical displacement were used for the first time by McCracken et al. [13]. They were probably based on a confidence interval calculated with two repeated measures on 236 horses [14]. These thresholds have been adjusted to the method of data construction used in other IMU systems [15]. A growing number of studies have used these thresholds as an objective lameness detection [11,12,16]. However numerous asymmetry values of sound horses have been over these thresholds [8,17,18]. This might be explained by undetected subclinical, pain-mediated disease or by biological variation, but no consensus has yet been reached [19,20]. Recently, a discrimination method of statistical analysis was applied on 25 Thoroughbred racehorses to redefine higher thresholds, (14.5 mm for the head and 7.5 mm for the pelvis) [21]. In this study, the focus was on specificity because the objective was to screen horses before racing. These results have given guidelines but require further investigations with heterogeneous horses and lameness types using a clinical environment faced by practitioners.

The goals of this clinical observational study were (i) to establish which asymmetry indices have the best sensitivity and specificity to reflect the visual assessment of single-limb lameness made by expert clinicians as part of their routine practice. (ii) Then, for the relevant indices, the aim was to determine the threshold of lameness detection and lame limb identification. This first study was limited to the following conditions: at trot, in hand, on a straight line and on a hard surface.

2. Materials and Methods

This clinical observational retrospective study was approved by the clinical research ethics committee (ComERC no2022-01-19).

2.1. Horses

This study was conducted on horses ($n = 224$), presented at a clinic for locomotor evaluation from August 2019 until October 2021. The sample was composed of 46% females, 47% geldings and 7% stallions; 48% Selle Français, 7% KWPN, 5% trotters and 40% other breeds; 62% showjumpers, 11% dressage, 10% eventing, and 17% other disciplines; aged from 2 to 20 years (mean \pm SD, 9 ± 3 years).

2.2. Locomotor Examination

After collecting the anamnesis and performing the examination of the locomotor system, the veterinarian evaluated the horse locomotion without warm-up. As part of the dynamic locomotor examination, horses were trotted by their owner/groom on a straight line of 25 meters long. The handler was asked to run at adequate speed and to keep a steady pace. The ground surface was made of asphalt. Visual evaluation was performed by one of the five expert veterinarians graduated as DESV (French certification as a specialist in equine locomotor pathology) and certified ISELP (International Society of Equine Locomotor Pathology). Based on this evaluation on the straight line, horses were classified into five groups: right forelimb (RF) lame, left forelimb (LF) lame, right hindlimb (RH) lame, left hindlimb (LH) lame, and sound horses.

In total, 381 horses were screened and were evaluated lame on a straight line. Among them, 209 horses showed lameness grade ranging between 2/10 (inclusive) and 6/10 (inclusive) on a 11-grades scale equivalent to the UK scale (where 0 is: Sound and 10 is: Non-weight bearing lameness) [22–24]. Horses showing lameness on multiple limbs on the straight line were excluded ($n = 33$). With these criteria, 67 horses showed RF lameness, 62 horses showed LF lameness, 23 horses showed RH lameness, and 23 horses showed LH lameness. Flowchart is provided as Figure S1. Lameness grades included in each group are summarized in Table 1.

Table 1. Number of horses showing a lameness depending on the location and the grade according to the 11-grades UK lameness scale. Mean \pm SD¹ of lameness grade in each lame horses group.

Clinical Lameness Grade	2/10	3/10	4/10	5/10	6/10	Total	Mean \pm SD
Right Forelimb lameness	35	9	17	4	2	67	1.5 \pm 0.7
Left Forelimb lameness	40	9	7	4	2	62	1.4 \pm 0.8
Right Hindlimb lameness	7	4	11	0	1	23	1.7 \pm 0.5
Left Hindlimb lameness	7	6	5	1	4	23	1.8 \pm 0.6

SD¹—standard deviation.

Forty-nine horses were included in the group of “sound” horses. These sound horses have been presented at the clinic for pre-purchase examination or for gait evaluation prior to further training. In this group were included individuals who met all of the following criteria (1) and (2). (1) The sound horses were in training and judged by their owners to be capable of performing all the exercises required for their sport level. (2) A full locomotor examination of these horses by an expert clinician revealed no abnormalities deemed significant under any of the examination conditions. This examination included: walk, trot on a hard circle at both reins, on a hard straight line, four flexion tests (one for each limb), trot on a soft circle at both reins.

2.3. Data Collection

During the locomotor examination, as part of the clinical routine, horses were systematically equipped with the EQUISYM[®] (Arioneo, LIM France, Nouvelle-Aquitaine, France) system consisting of seven wireless IMUs placed on the head, the withers, the pelvis, and the four cannon bones (Figure 1). They recorded tri-axial angular velocity within a range of 2000°/s and tri-axial acceleration within a range of 16 g, at a frequency of 200 Hz during approximately two trot-ups, corresponding to a mean of 14.7 \pm 7.8 trot strides on a straight line. Data were recorded on the sensors and downloaded wirelessly.



Figure 1. Horse equipped with EQUISYM[®] system, composed by sensors placed on the head, the withers, the pelvis and the four cannon bones (shown by the red arrows).

2.4. Data Processing

First, stance phase periods, e.g., foot-on and foot-off times, were determined based on the analysis of the gyroscopic signals recorded on the four cannon bones owing to the method developed by Hatrisse et al. [25]. One stride was defined as the time between two consecutive foot-on of the left forelimb.

Then vertical displacements of the head, withers and pelvis were segmented into strides. The acceleration signal measured along the dorso-ventral axis of the horse was integrated twice and high-pass filtered using a fourth-order Butterworth filter with a cut-off frequency set to 1 Hz to obtain displacement curves [4,26].

Based on the vertical displacement of the head ($_H$), withers ($_W$) and pelvis ($_P$) occurring along a stride, four variables were calculated for each sensor location. The following asymmetry indices (AI), expressed as a percentage of the maximal range of motion within a stride, were used to compare left vs. right part of the stride (Figure 2): AI-Min was the left-right difference of the lowest point of the vertical excursion; AI-Max was the left-right difference of the highest point of the vertical excursion; AI-up was the left-right difference of the upward range of motion during the propulsion phase; and AI-down was the left-right difference of the downward range of motion during the damping phase. Positive AI value indicated a smaller movement amplitude during the right stance than during left stance, and negative AI value indicated the opposite.

All calculations were performed with custom-made Matlab2020a (The MathWorks, Natick, MA, USA) scripts.

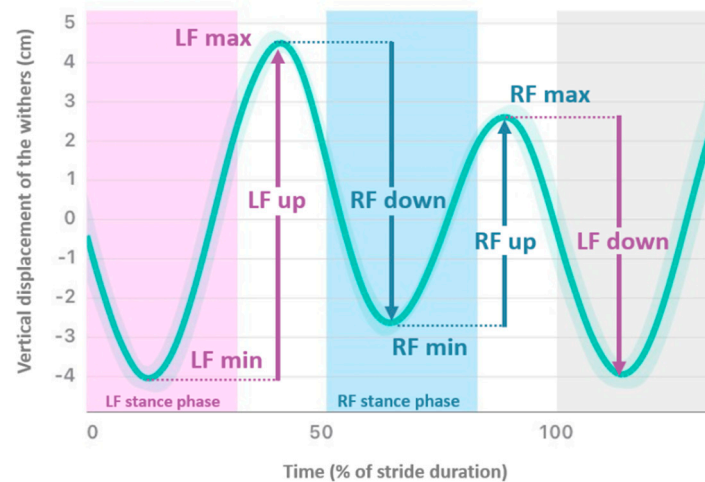


Figure 2. Mean vertical displacement (cm) of the withers plotted against time (expressed as % of stride duration) of a horse showing right forelimb (RF) lameness. Asymmetry Indices (AI) are: $AI\text{-min} = RF\text{min} - LF\text{min} / LF\text{up}$; $AI\text{-max} = LF\text{max} - RF\text{max} / LF\text{up}$; $AI\text{-up} = LF\text{up} - RF\text{up} / LF\text{up}$; $AI\text{-down} = LF\text{down} - RF\text{down} / LF\text{down}$. (LF—Left Forelimb).

2.5. Data Analysis

Mean and standard deviation (SD) were calculated from data collected in each group. Normality was assessed using graphical methods [27]. Open software RStudio (RStudio Inc., Boston, MA, USA, version 4.1.3) was used, including the packages ROCR, pROC and boot. The four AIs calculated from head, withers, and pelvis were analyzed. Receiver operating characteristic (ROC) curves were plotted to discriminate each lame limb group (RF, LF, RH, LH) from the control group (sound horses). Area under curve (AUC) of the ROC curves was calculated. Then, thresholds with highest specificity and sensitivity using the top-left method were calculated. The top-left method involves choosing the threshold related to the curve point closest to the upper-left corner of the graph. 95% confidence interval (95% CI, which values are expressed into [;] in the text) was obtained from the repartition of the best specificities and sensitivities calculated for 400 samples, using the bootstrap method based on resampling to estimate the confidence interval [28]. In this study, indices were considered having good discrimination capacity if the sum of sensitivity and specificity was strictly higher than 150% [29].

3. Results

3.1. Descriptive Results

Mean \pm SD for each AI and for each horse group are summarized in Table 2 and boxplots are plotted in Figure 3.

Means of the AIs in sound horses were close to 0% of asymmetry, particularly for the withers ($AI\text{-min} = -3\% \pm 8\%$; $AI\text{-max} = 2\% \pm 8\%$; $AI\text{-up} = -1\% \pm 9\%$ and $AI\text{-down} = -3\% \pm 11\%$). The head ($AI\text{-min} = -7\% \pm 29\%$ and $AI\text{-up} = -11\% \pm 29\%$) and pelvis ($AI\text{-min} = 6\% \pm 8\%$, $AI\text{-up} = 5\% \pm 13\%$ and $AI\text{-down} = 5\% \pm 11\%$) showed higher absolute mean values than the withers. The negative sign of AIs for the withers and the positive sign of AIs for the pelvis expressed reduced range of movement during the LF and RH stance phase.

RF lame horses showed higher mean values (sign of a reduced movement on the right) than sound horses for all AIs of the head and withers, and discrete lower mean values (sign of a reduced movement on the left) for all AIs of the pelvis, except $AI\text{-down}_P$. Like a mirror, LF lame horses showed lower mean values than sound horses for all AIs of the head and withers, and higher mean values for all AIs of the pelvis, except $AI\text{-max}_H$ and $AI\text{-down}_P$.

Horses with RH lameness showed higher mean values (sign of a reduced movement on the right) than sound horses for all AIs of the head and pelvis, except $AI\text{-down}_P$, and

showed discrete lower mean values (sign of a reduced movement on the left) for all AIs of the withers. Like a mirror, LH lame horses showed lower mean values than sound horses for all AIs of the head and pelvis, except AI-max_H and AI-down_P, and they showed higher mean values for all AIs of the withers.

Table 2. Mean ± SD of AIs of the head, the withers and the pelvis in sound, RF lame, LF lame, RH lame, and LH lame horses trotting on a hard straight line.

Location	AI ¹	Sound	RF ²	LF ³	RH ⁴	LH ⁵
Head (_H)	AI-min_H (%)	-7 ± 29	34 ± 30	-41 ± 38	22 ± 18	-27 ± 33
	AI-max_H (%)	-4 ± 12	10 ± 17	-1 ± 27	-2 ± 16	-1 ± 27
	AI-up_H (%)	-11 ± 29	44 ± 36	-42 ± 36	21 ± 21	-28 ± 36
	AI-down_H (%)	-2 ± 29	31 ± 35	-29 ± 37	25 ± 21	-19 ± 32
Withers (_W)	AI-min_W (%)	-3 ± 8	16 ± 15	-17 ± 18	-6 ± 8	9 ± 13
	AI-max_W (%)	2 ± 8	8 ± 9	-5 ± 14	-2 ± 7	6 ± 12
	AI-up_W (%)	-1 ± 9	24 ± 20	-22 ± 14	-7 ± 13	15 ± 18
	AI-down_W (%)	-3 ± 11	9 ± 14	-10 ± 24	-4 ± 7	2 ± 15
Pelvis (_P)	AI-min_P (%)	6 ± 8	1 ± 8	7 ± 10	16 ± 12	-13 ± 19
	AI-max_P (%)	-1 ± 9	-8 ± 11	6 ± 12	14 ± 10	-25 ± 16
	AI-up_P (%)	5 ± 13	-7 ± 15	13 ± 16	30 ± 17	-38 ± 27
	AI-down_P (%)	5 ± 11	7 ± 11	0 ± 14	1 ± 15	10 ± 18

AI¹—asymmetry indice, RF²—right forelimb, LF³—left forelimb, RH⁴—right hindlimb, LH⁵—left hindlimb.

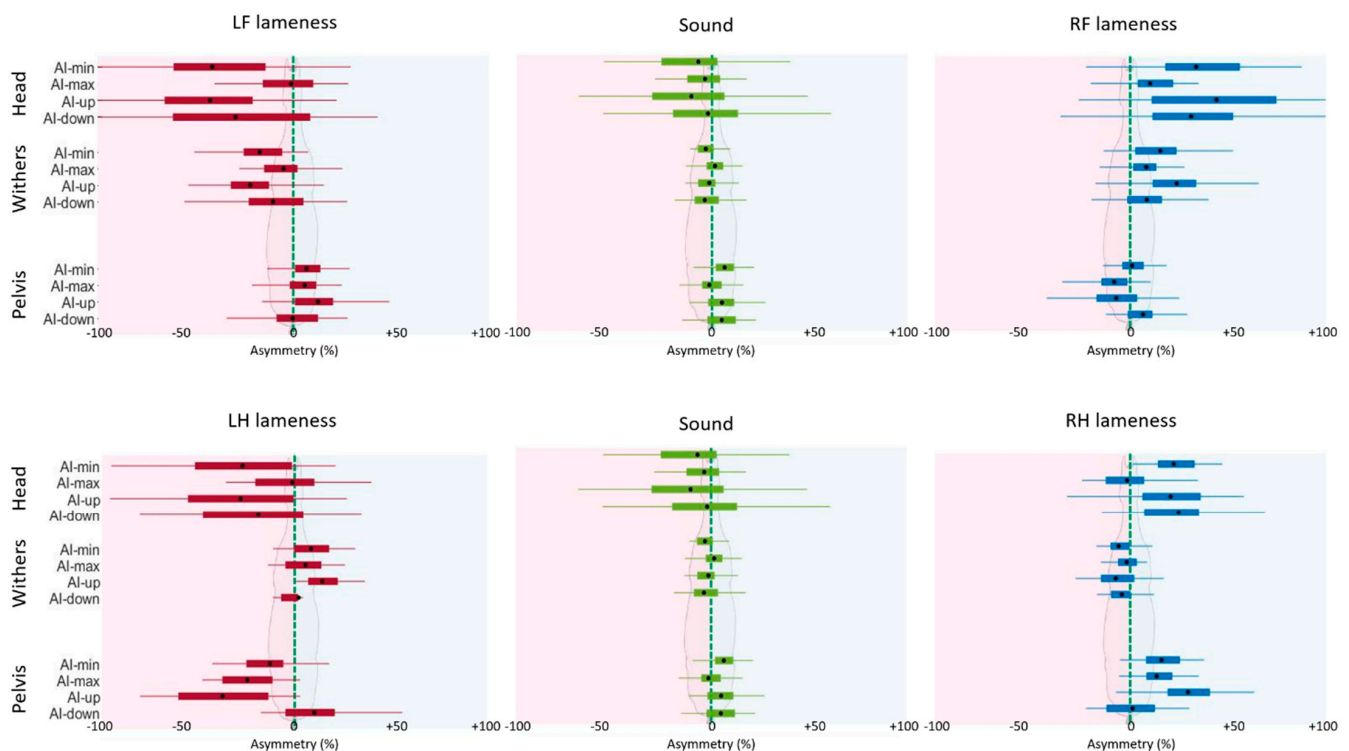


Figure 3. Boxplots of asymmetry indice (AI) in % for sound, left forelimb (LF), right forelimb (RF), left hindlimb (LH), and right hindlimb (RH) lame horses. The black dot represents the mean, the 2 extremities of the box are 25th and 75th percentiles, and extremities of the whiskers represent extreme data points not considered outliers. Negative value represents smaller movement on the left limb.

3.2. Forelimb Lameness Discrimination

ROC curves are presented in Figure 4 for forelimbs lameness discrimination. Calculated from these ROC curves, AUC, best sensitivity and specificity, and threshold associated are summarized in Table 3. ROC curves for RF lameness discrimination showed highest

AUC values of 91% [95% CI, 85;96] (AI-up_W), 90% [84;95] (AI-up_H), 90% [83;95] (AI-min_W), and 86% [78;93] (AI-min_H). The lowest AUC values were of 55% (AI-down_P), 70% (AI-min_P), 72% (AI-max_P), and 72% (AI-down_W).

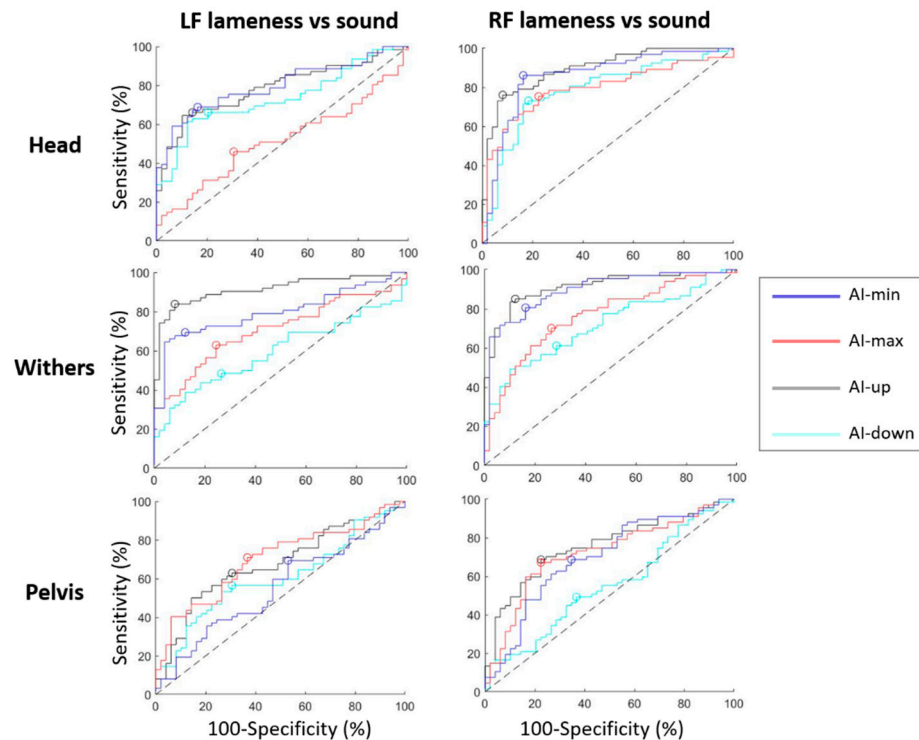


Figure 4. ROC curves discriminating horses with left forelimb (LF) lameness from sound horses; and discriminating horses with right forelimb (RF) lameness from sound horses, plotted for each sensor location (head, withers, pelvis); and plotted for asymmetry indice: AI-min (blue), AI-max (red), AI-up (black) and AI-down (cyan). The best specificity and sensitivity point of each curve is represented by a circle. The dashed black line is the hypothesized ROC curve with discrimination capacity only due to perfect chance.

Table 3. Area under the curve (AUC) of the receiver operating characteristic (ROC) curve discriminating sound and forelimb lame horses, for each asymmetry indice (AI). Best sensitivity, specificity, and associated threshold were calculated using top-left method of ROC analysis. [95% confidence interval] were calculated plotting ROC analysis on 400 population resamplings (bootstraps). Results for which the sum of sensitivity and specificity is over 150% for both sides are in bold.

AI	AUC RF ¹ (%)	Sensitivity RF (%)	Specificity RF (%)	Threshold RF (%)	AUC LF ² (%)	Sensitivity LF (%)	Specificity LF (%)	Threshold LF (%)
AI-min_H	86 [78;93]	86 [78;95]	84 [73;92]	6 [−6;13]	79 [71;87]	69 [54;78]	84 [73;96]	−30 [−38;−24]
AI-max_H	79 [70;87]	75 [64;86]	78 [63;87]	5 [−1;10]	48 [38;59]	46 [29;53]	69 [53;87]	−10 [−24;−4]
AI-up_H	90 [84;95]	76 [62;81]	92 [85;100]	24 [14;45]	79 [70;87]	66 [51;76]	86 [74;100]	−36 [−49;−26]
AI-down_H	79 [70;87]	73 [61;81]	82 [70;94]	17 [10;25]	73 [65;83]	66 [56;79]	80 [66;85]	−25 [−29;−18]
AI-min_W	90 [83;95]	81 [68;90]	84 [71;93]	3 [−2;6]	79 [71;87]	69 [57;79]	88 [77;98]	−10 [−14;−8]
AI-max_W	77 [68;86]	70 [56;81]	73 [59;85]	6 [3;9]	71 [61;79]	63 [48;72]	76 [65;89]	−2 [−6;0]
AI-up_W	91 [85;96]	85 [77;93]	88 [78;95]	7 [1;10]	91 [85;95]	84 [74;91]	92 [84;100]	−10 [−13;−8]
AI-down_W	72 [61;80]	61 [41;75]	71 [49;89]	1 [−7;7]	58 [48;69]	48 [22;58]	73 [56;100]	−8 [−16;−4]
AI-min_P	70 [59;78]	69 [56;85]	65 [45;74]	4 [1;7]	55 [43;64]	69 [59;95]	47 [18;54]	5 [−2;7]
AI-max_P	72 [63;81]	67 [55;77]	78 [66;89]	−5 [−7;−4]	70 [60;79]	71 [58;86]	63 [44;73]	1 [−2;4]
AI-up_P	76 [67;84]	69 [55;78]	78 [66;90]	−3 [−7;0]	67 [57;77]	63 [52;77]	69 [48;76]	10 [6;13]
AI-down_P	55 [44;67]	49 [32;59]	63 [48;78]	7 [4;12]	61 [50;71]	56 [47;68]	69 [53;81]	1 [−3;6]

RF¹—right forelimb, LF²—left forelimb. Results for which the sum of sensitivity and specificity is over 150% for both sides are in bold.

As well, ROC curves for LF lameness discrimination showed highest AUC values of 91% [85;95] (AI-up_W), 79% [71;87] (AI-min_W), 79% [71;87] (AI-min_H), and 79% [70;87] (AI-up_H). The lowest AUC values were of 48% (AI-max_H), 55% (AI-min_P), 58% (AI-down_W), and 61% (AI-down_P).

For RF and LF lameness respectively, thresholds of +7% [+1;+10] and -10% [$-13;-8$] of asymmetry for AI-up_W resulted in 85% [77;93] and 84% [74;91] sensitivity and 88% [78;95] and 92% [84;100] specificity respectively.

3.3. Hindlimb Lameness Discrimination

ROC curves are presented in Figure 5 for hindlimbs lameness discrimination. Calculated from these ROC curves, AUC, best sensitivity and specificity, and threshold associated are summarized in Table 4. ROC curves for RH lameness discrimination showed highest AUC values of 88% [77;95] (AI-max_P), 86% [74;95] (AI-up_P), 84% [75;93] (AI-min_H), 81% [71;91] (AI-up_H), and 80% [69;89] (AI-down_H). The lowest AUC values were of 51% (AI-max_H), 54% (AI-down_W), 59% (AI-max_W), 62% (AI-up_W and AI-min_W).

As well, ROC curves for LH lameness discrimination showed highest AUC values of 96% [90;99] (AI-up_P), 89% [80;96] (AI-max_P), 89% [77;98] (AI-min_P). The lowest AUC values were of 48% (AI-max_H), 55% (AI-down_W), 57% (AI-down_P), and 58% (AI-down_H).

For RH and LH lameness respectively, a threshold of +18% [+16;+27] and -7% [$-12;+2$] of asymmetry for AI-up_P resulted in 83% [65;91] and 91% [82;100] sensitivity, and 90% [82;100] and 86% [69;91] specificity. Thresholds of +6% [+2;+8] and -10% [$-19;-6$] of asymmetry for AI-max_P resulted in 87% [75;100] and 78% [59;86] sensitivity, and 82% [64;88] and 88% [78;100] specificity respectively.

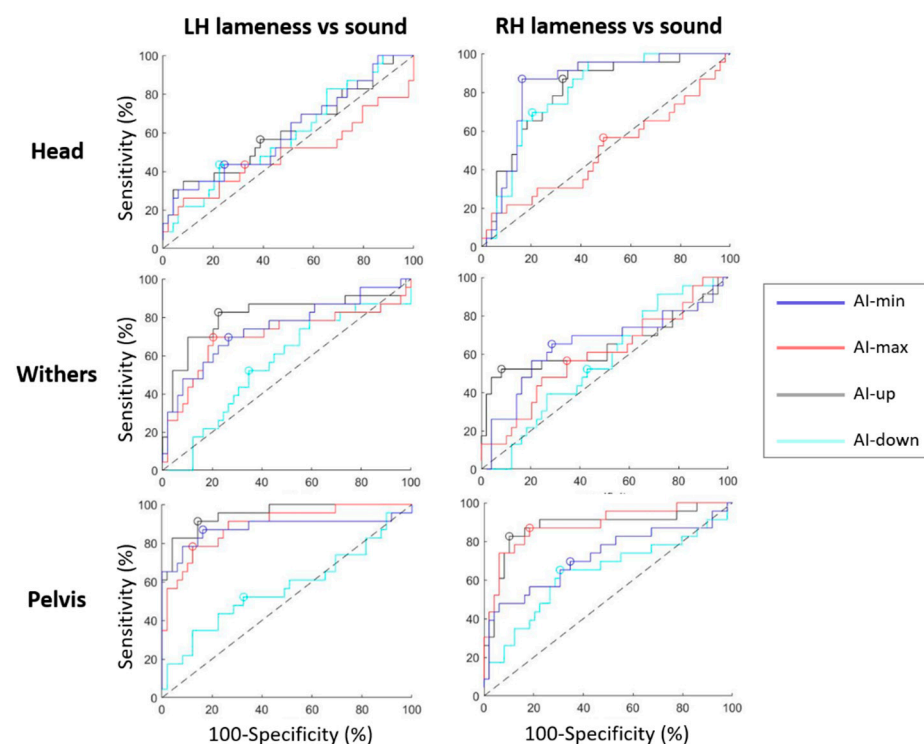


Figure 5. ROC curves discriminating horses with left hindlimb (LH) lameness from sound horses; and discriminating horses with right hindlimb (RH) lameness from sound horses, plotted for each sensor location (head, withers, pelvis); and plotted for asymmetry indice: AI-min (blue), AI-max (red), AI-up (black), and AI-down (cyan). The best specificity and sensitivity point of each curve is represented by a circle. The dashed black line is the hypothesized ROC curve with discrimination capacity only due to perfect chance.

Table 4. Area under the curve (AUC) of the receiver operating characteristic (ROC) curve discriminating sound and hindlimb lame horses, for each asymmetry indice (AI). Best sensitivity, specificity and associated threshold were calculated using top-left method of ROC analysis. [95% Confidence Interval] were calculated plotting ROC analysis on 400 population resamplings (bootstraps). Results for which the sum of sensitivity and specificity is over 150% for both sides are in bold.

AI	AUC RH ¹ (%)	Sensitivity RH (%)	Specificity RH (%)	Threshold RH (%)	AUC LH ² (%)	Sensitivity LH (%)	Specificity LH (%)	Threshold LH (%)
AI-min_H	84 [75;93]	87 [73;100]	84 [73;95]	8 [4;11]	60 [45;76]	43 [6;47]	76 [64;100]	−25 [−53;−16]
AI-max_H	51 [36;66]	57 [34;70]	51 [23;63]	−5 [−14;3]	48 [32;66]	43 [17;45]	67 [47;84]	3 [−2;24]
AI-up_H	81 [71;91]	87 [74;100]	67 [47;75]	−1 [−18;7]	60 [46;75]	57 [37;73]	61 [33;78]	−19 [−42;6]
AI-down_H	80 [69;89]	70 [41;77]	80 [67;100]	16 [8;35]	58 [43;73]	43 [8;49]	78 [66;100]	−22 [−53;−14]
AI-min_W	62 [47;76]	65 [46;82]	71 [55;83]	−6 [−10;−3]	75 [61;86]	70 [50;85]	73 [57;86]	0 [−4;3]
AI-max_W	59 [43;72]	57 [37;70]	65 [46;79]	0 [−4;3]	70 [55;84]	70 [51;88]	80 [66;92]	7 [4;9]
AI-up_W	62 [46;76]	52 [29;64]	92 [74;100]	−11 [−21;−5]	81 [67;92]	83 [70;100]	78 [59;87]	3 [−6;7]
AI-down_W	54 [41;68]	52 [20;64]	57 [37;75]	−5 [−12;−1]	55 [41;69]	52 [19;59]	65 [53;90]	−7 [−13;−4]
AI-min_P	72 [58;84]	70 [53;91]	65 [33;78]	10 [1;15]	89 [77;98]	87 [76;100]	84 [68;90]	−1 [−4;5]
AI-max_P	88 [77;95]	87 [75;100]	82 [64;88]	6 [2;8]	89 [80;96]	78 [59;86]	88 [78;100]	−10 [−19;−6]
AI-up_P	86 [74;95]	83 [65;91]	90 [82;100]	18 [16;27]	96 [90;99]	91 [82;100]	86 [69;91]	−7 [−12;2]
AI-down_P	64 [49;77]	65 [47;84]	69 [54;81]	0 [−3;4]	57 [42;71]	52 [33;63]	67 [47;82]	9 [2;17]

RH¹—right hindlimb, LH²—left hindlimb. Results for which the sum of sensitivity and specificity is over 150% for both sides are in bold.

3.4. Asymmetry Thresholds of Reliable Indices

With a sum of sensitivity and specificity over 150%, head (AI-min_H and AI-up_H) and withers (AI-min_W and AI-up_W) indices discriminated the LF lame horses from sound horses. As well, head (AI-min_H, AI-max_H, AI-up_H, and AI-down_H) and withers (AI-min_W and AI-up_W) indices discriminated the RF lame horses from sound horses.

With a sum of sensitivity and specificity over 150%, withers (AI-up_W) and pelvis (AI-min_P, AI-max_P, and AI-up_P) indices discriminated the LH lame horses from sound horses. As well, head (AI-min_H and AI-up_H) and pelvis (AI-max_P and AI-up_P) indices discriminated the RH lame horses from sound horses.

Thresholds and their 95% CI associated with a sum of sensitivity and specificity over 150% for both right and left lameness discrimination were plotted in Figure 6.

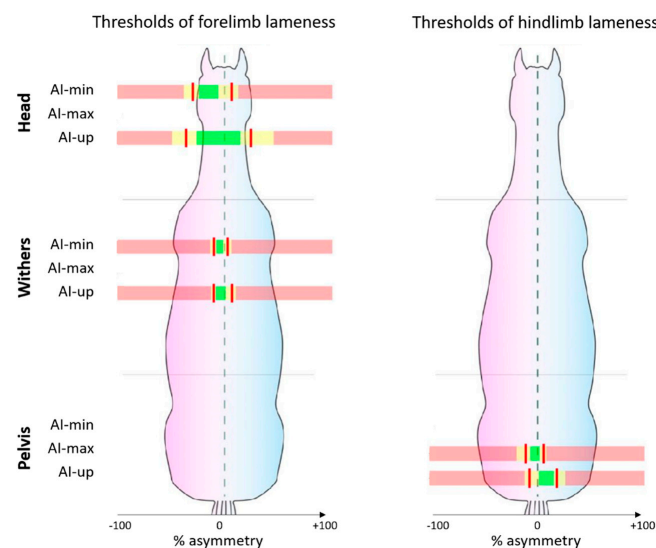


Figure 6. Thresholds (red line) of asymmetry indices (AI) (in % of asymmetry) for forelimb and hindlimb lameness discrimination. Only the AIs with the sum of sensitivity and specificity over 150% for both right and left lameness are plotted. Three range of values are represented: yellow for 95% confidence interval (95% CI) around the threshold, green for values below the 95% CI (“sound” horses) and red for values beyond the 95% CI (“lame” horses).

4. Discussion

Description of AIs provided by the head, withers, and pelvis from sound horses showed that almost no asymmetry was detected on the withers, whereas head and pelvis showed slightly lower range of movement during the RF-LH stance phase. In lame horses, the withers and pelvis showed reduced range of movement during the stance phase of respectively the front and hind lame limb. The head also showed reduced movement during the stance phase of a lame forelimb. Conversely, the head showed increased movement during the stance phase of a lame hindlimb.

Our study confirms the hypothesis that head and withers vertical displacements are indicators of forelimb lameness. Indeed, head indices (AI-min_H, AI-up_H) and withers indices (AI-min_W and AI-up_W) are the indices with the highest sensitivity and specificity (sum of sensitivity and specificity greater than 150%) for discriminating horses with forelimb lameness from sound horses. Among them, AI-up_W discriminated forelimb lameness with the highest sensitivity (>84%) and specificity (>88%).

For hindlimb lameness, pelvic vertical displacement was the most consistent indicator. Withers and head vertical displacement were also modified, with compensatory movements but only indices from the pelvis (AI-max_P and AI-up_P) discriminated both sides hindlimb lameness with sensitivity over 78% and specificity over 82%.

Among the four indices (AI-up, AI-max, AI-min, AI-down) used in this study, it was shown that AI-down indice has systematically a low sensitivity and specificity for discriminating both hindlimb and forelimb lame horses from sound horses. This result suggests that the AI-down indice should not be considered as the most useful indice in future work.

Main results give the following guidelines: associated with the highest sensitivity and specificity, AI-up_W discriminates LF lame horses under -10% of asymmetry and RF lame horses over $+7\%$ of asymmetry from sound horses. Associated with the highest sensitivity and specificity, AI-up_P discriminates LH lame horses under -7% of asymmetry and RH lame horses over $+18\%$ of asymmetry from sound horses. These observations confirm that the upward movement of the pelvis has the highest power to discriminate hindlimb lameness [30].

Higher relevance of the withers data than the head data contradicts previous studies [5,21]. Head shows greater movement asymmetry than withers, helping the visual assessment for forelimb lameness. However, the head is subjected to random movements existing in restless horses [7,8,10,31]. This study demonstrates that the withers movement provides useful and relevant information to detect forelimb lameness. Although having a lower reliability, head movement indices provide additional information useful to differentiate forelimb and hindlimb lameness [11,32].

Moreover, absolute threshold values of the head asymmetry were different in our study between the right and the left side of lameness discrimination (AI-up_H: $+24\%$ for RF vs. -36% for LF; AI-min_H: $+6\%$ for RF vs. -33% for LF). This difference may reflect different types of lameness between the RF and the LF lame horses in our reference population. This difference could also reflect an artefactual reduced movement of the head during the LF stance phase, compared to the RF stance phase for sound horse. Explanation could be found because horses were trotted in-hand on their left side by their owner or groom. This artefactual asymmetry may be induced by the handler despite instructions not to hold the head too firmly and to release the lunge. The head was either pulled forward, either hold backward depending on the spontaneous speed of the horse. This difference was not highlighted in other studies, which were maybe performed under more standardized conditions [33]. To a lesser extent, a similar phenomenon to the other side appeared on the pelvis in sound horses (AI-min_P mean of $+6\%$; AI-up_P $+5\%$; AI-down_P $+5\%$).

Here AIs were divided by the range of movement, generating relative indices expressed in %. Values in millimeters are also provided in Table S1. Normalizing values seems natural in order to compare movement measured in a heterogeneous population, possibly including ponies. In addition, normalizing may lead to an easier comparison of

asymmetry indices processed by different gait analysis systems [15,34]. Previous studies [13,21] have however expressed thresholds in millimeters. Pfau et al. [21] found that the threshold of HDmin was 14.5 mm for forelimb lameness discrimination. As well, PDmax discriminated hindlimb lameness from 10 mm with a low sensitivity. Contrary to our results, PDmin was more reliable than PDmax, and the head was more reliable than the withers. Pfau et al. focused on specificity in a selection context (racing Thoroughbreds for the purpose of “lameness screening”) where false positives should be avoided. Conversely, in a clinical context, a fair balance between sensitivity and specificity must be found to limit both false positives (inducing unnecessary costly investigations and anxiety of the owner) and false negatives [21]. This choice may explain differences with the results of Pfau et al. [21]. Other differences were: the lack of differentiation between right and left lameness, the study of a homogeneous population, and the subjective evaluation made by five assessors using video.

In the present study, we noticed that forelimb lameness also decreased the pelvic vertical range of motion during the lame limb stance phase. This observation has been previously noticed in other studies [35,36]. LH lameness showed a small impact on the head but decreased the withers movement during RF stance phase. Contrary to LH lameness, RH lameness increased the head movement during LF stance phase. This supports the hypothesis that the head, the withers, and the pelvis provide complementary information about the lameness location [11,37].

The low number of hindlimb lame horses (23 RH and 23 LH) may induce a bias. Furthermore, all lameness were included regardless of the type of injury diagnosed. It is obvious that some indices may be more or less modified according to the type of injury. To go further, more horses and specific groups for each type of diagnosed injury or clinical manifestation will be needed. This must be in the future roadmap.

Another limitation of this study is the clinical reference used to detect lame horses from non-lame horses and single limb lameness vs. multi-limbs lameness because this clinical assessment is recognized by definition as being subjective [2]. In the present study, visual examination of lameness by expert clinicians in the real context of the clinical examination, in the field, has been chosen as a reference to establish thresholds and calculate their sensitivity and specificity. This choice must, of course, be discussed as it is well known that visual assessment by experts is subject to many uncertainties (e.g., lack of repeatability and reproducibility) [1]. Visual assessment is not considered a “gold standard” in the present study, but only as a reference to what exists in the best possible conditions. In order for clinicians to appropriate the tools for quantifying locomotor asymmetries, it seems indeed necessary to give them an idea of the threshold values which, on these devices, correspond to what they are used to seeing and concluding subjectively with the classical (even imperfect) methods. This first step seems necessary because it is only once these benchmarks have been established that real progress can be made in interpreting the data from the quantification systems. The challenge here is to avoid the slightest asymmetry measured by a quantification system from being mistaken for lameness. It should indeed be remembered that the definition of lameness refers to a veterinarian’s diagnosis and not to a machine. The machine can only be considered as a quantitative aid to a multi-factorial medical decision. In this study, the real condition of clinical routine was deliberately chosen in order to reflect the real-life examination of lame horses. Five highly experienced veterinarians were involved. Their experience and their identical and consistent method of assessment are likely to increase the agreement rate [35,38], although this result can be discussed [1]. The agreement could for example be slightly increased if the experts had not been informed of the owner’s request. In this context, the lowest grade of lameness (1/10) was deliberately excluded because of weaker agreement for very subtle asymmetries [1].

5. Conclusions

Although quite small 95% CIs were found, an increased number of horses improved threshold accuracy. This study highlights the most relevant indices (AI-up_W for forelimb

lameness and AI-up_P for hindlimb lameness) and indicates an order of magnitude of the thresholds and their 95% CIs. These thresholds can be used as a first support to discriminate between lame (from grade 2/10) and non-lame horses, bearing in mind the value of the 95% CIs which prohibits the use of these thresholds as an absolute cut-off value. In any case, these indicators can only be interpreted in the light of a global clinical expertise taking into account that there is not only one type of lameness but multiple clinical manifestations of locomotor disorders depending on the type of lesion. Subtle lameness (1/10 grade) have not been included here; further studies are warranted to refine the thresholds for horses with subtle lameness.

Moreover, forelimb and hindlimb lameness were analyzed separately and multi-limb lame horses were excluded. It should therefore be kept in mind that the interrelationship between the movements of the head, withers, and pelvis still requires further work. Future studies with multivariate analysis are needed to provide more information on the lame limb identification and relationship between the indices in various clinical circumstances.

In the longer term, the application of this study is aimed at a wider range of conditions in veterinary practice. A main limitation is that all measures were recorded under specific and standardized conditions. In the following years, further data are needed to refine lameness detection thresholds under conditions where physiological asymmetries are known to be higher (circles for instance) [38].

Supplementary Materials: The following supporting information can be downloaded at: <https://www.mdpi.com/article/10.3390/ani12243498/s1>. Figure S1: Flowchart of the exclusion/inclusion criteria of the screened horses, which were visually considered lame on a straight line by an expert veterinarian during his routine practice. Table S1: Table of the mean asymmetry indice (AI) in % and the mean of the non-normalized differences (Diff) in centimeters between minima and/or maxima of the vertical displacement of the head (_H), the withers (_W), and the pelvis (_P) for all horses included in the study at the trot on the straight line. These horses were visually assessed as sound, right forelimb (RF) lame, left forelimb (LF) lame, right hindlimb (RH) lame, or left hindlimb (LH) lame.

Author Contributions: Conceptualization, C.M., F.M., P.M. and H.C.; methodology, C.M., S.H.-P., F.M., P.M. and H.C.; software, C.M., S.H.-P., C.H. (Chloé Hattrisse) and C.H. (Camille Hébert); validation, C.M., S.H.-P., E.D.A. and C.H. (Camille Hébert); formal analysis, C.M. and S.H.-P.; investigation, E.D.A., J.-M.D., V.C., S.J., L.B. and A.T.; resources, E.D.A., J.-M.D., V.C., S.J., L.B., A.T., F.A., C.H. (Camille Hébert) and P.M.; data curation, C.M. and E.D.A.; writing—original draft preparation, C.M.; writing—review and editing, S.H.-P., F.A., F.M., P.M. and H.C.; visualization, C.M.; supervision, F.M., P.M. and H.C.; project administration, P.M. and H.C.; funding acquisition, P.M. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by the Agence Nationale de la Recherche (LabCom “CWD-Vetlab”, Contract ANR 16-LCV2-0002-01), the European Regional Development Fund (FEDER) and the Region Normandie (Project “EquiSym”, Contract 20E01636).

Institutional Review Board Statement: The animal study protocol was approved by the Ethics Committee of COMITE D’ETHIQUE EN RECHERCHE CLINIQUE—ComERC (n°2022-01-19).

Informed Consent Statement: Informed consent was obtained from the owner of all the subjects involved in the study.

Data Availability Statement: The data that support the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

Acknowledgments: The authors thank the Centre d’Imagerie et de Recherche sur les Affections Locomotrices Equines (CIRALE). They also thank Alexandre Charles, Anne-Claire Idoux, Antoinette Terlinden and Alberto De la Rocha who actively contributed to the data collection.

Conflicts of Interest: The project was supported by the Agence Nationale de la Recherche (ANR) which sponsors a collaborative project between a company (LIM France) and the Ecole Nationale Vétérinaire d’Alfort (ENVA).

References

1. Keegan, K.G.; Dent, E.V.; Wilson, D.A.; Janicek, J.; Kramer, J.; Lacarrubba, A.; Walsh, D.M.; Cassells, M.W.; Esther, T.M.; Schiltz, P.; et al. Repeatability of subjective evaluation of lameness in horses: Repeatability of subjective evaluation of lameness in horses. *Equine Vet. J.* **2010**, *42*, 92–97. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
2. Starke, S.D.; Oosterlinck, M. Reliability of equine visual lameness classification as a function of expertise, lameness severity and rater confidence. *Vet. Rec.* **2019**, *184*, 63. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
3. Marin, F. Human and Animal Motion Tracking Using Inertial Sensors. *Sensors* **2020**, *20*, 6074. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
4. Warner, S.M.; Koch, T.O.; Pfau, T. Inertial sensors for assessment of back movement in horses during locomotion over ground: Inertial sensors for back movement. *Equine Vet. J.* **2010**, *42*, 417–424. [[CrossRef](#)]
5. Buchner, H.H.F.; Savelberg, H.H.C.M.; Schamhardt, H.C.; Barneveld, A. Head and trunk movement adaptations in horses with experimentally induced fore- or hindlimb lameness. *Equine Vet. J.* **1996**, *28*, 71–76. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
6. Kramer, J.; Keegan, K.G.; Kelmer, G.; Wilson, D.A. Objective determination of pelvic movement during hind limb lameness by use of a signal decomposition method and pelvic height differences. *Am. J. Vet. Res.* **2004**, *65*, 741–747. [[CrossRef](#)]
7. Keegan, K.G.; Pai, P.F.; Wilson, D.A.; Smith, B.K. Signal decomposition method of evaluating head movement to measure induced forelimb lameness in horses trotting on a treadmill. *Equine Vet. J.* **2010**, *33*, 446–451. [[CrossRef](#)]
8. Kallerud, A.S.; Fjordbakk, C.T.; Hendrickson, E.H.S.; Persson-Sjodin, E.; Hammarberg, M.; Rhodin, M.; Hernlund, E. Objectively measured movement asymmetry in yearling Standardbred trotters. *Equine Vet. J.* **2021**, *53*, 590–599. [[CrossRef](#)]
9. Greve, L.; Pfau, T.; Dyson, S. Thoracolumbar movement in sound horses trotting in straight lines in hand and on the lunge and the relationship with hind limb symmetry or asymmetry. *Vet. J.* **2017**, *220*, 95–104. [[CrossRef](#)]
10. Scheidegger, M.D.; Gerber, V.; Dolf, G.; Burger, D.; Flammer, A.; Ramseyer, A. Quantitative gait analysis before and after a cross-country test in a population of elite eventing horses. *J. Equine Vet. Sci.* **2022**, *117*, 104077. [[CrossRef](#)]
11. Rhodin, M.; Persson-Sjodin, E.; Egenvall, A.; Serra Bragança, F.M.; Pfau, T.; Roepstorff, L.; Weishaupt, M.A.; Thomsen, M.H.; van Weeren, P.R.; Hernlund, E. Vertical movement symmetry of the withers in horses with induced forelimb and hindlimb lameness at trot. *Equine Vet. J.* **2018**, *50*, 818–824. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
12. Reed, S.K.; Kramer, J.; Thombs, L.; Pitts, J.B.; Wilson, D.A.; Keegan, K.G. Comparison of results for body-mounted inertial sensor assessment with final lameness determination in 1224 equids. *J. Am. Vet. Med. Assoc.* **2020**, *256*, 590–599. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
13. McCracken, M.J.; Kramer, J.; Keegan, K.G.; Lopes, M.; Wilson, D.A.; Reed, S.K.; LaCarrubba, A.; Rasch, M. Comparison of an inertial sensor system of lameness quantification with subjective lameness evaluation: Comparison of inertial system with subjective lameness evaluation. *Equine Vet. J.* **2012**, *44*, 652–656. [[CrossRef](#)]
14. Keegan, K.G.; Kramer, J.; Yonezawa, Y.; Maki, H.; Pai, P.F.; Dent, E.V.; Kellerman, T.E.; Wilson, D.A.; Reed, S.K. Assessment of repeatability of a wireless, inertial sensor-based lameness evaluation system for horses. *Am. J. Vet. Res.* **2011**, *72*, 1156–1163. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
15. Pfau, T.; Boulton, H.; Davis, H.; Walker, A.; Rhodin, M. Agreement between two inertial sensor gait analysis systems for lameness examinations in horses. *Equine Vet. Educ.* **2016**, *28*, 203–208. [[CrossRef](#)]
16. Kallerud, A.S.; Hernlund, E.; Byström, A.; Persson-Sjodin, E.; Rhodin, M.; Hendrickson, E.H.S.; Fjordbakk, C.T. Non-banked curved tracks influence movement symmetry in two-year-old Standardbred trotters. *Equine Vet. J.* **2021**, *53*, 1178–1187. [[CrossRef](#)]
17. Rhodin, M.; Egenvall, A.; Haubro Andersen, P.; Pfau, T. Head and pelvic movement asymmetries at trot in riding horses in training and perceived as free from lameness by the owner. *PLoS ONE* **2017**, *12*, e0176253. [[CrossRef](#)]
18. Movement asymmetries in 200 non-lame elite and non-elite horses during in-hand trot. *Equine Vet. J.* **2021**, *53*, 10. [[CrossRef](#)]
19. Weeren, P.R.; Pfau, T.; Rhodin, M.; Roepstorff, L.; Serra Bragança, F.; Weishaupt, M.A. Do we have to redefine lameness in the era of quantitative gait analysis? *Equine Vet. J.* **2017**, *49*, 567–569. [[CrossRef](#)]
20. Serra Bragança, F.M.; Rhodin, M.; van Weeren, P.R. On the brink of daily clinical application of objective gait analysis: What evidence do we have so far from studies using an induced lameness model? *Vet. J.* **2018**, *234*, 11–23. [[CrossRef](#)]
21. Pfau, T.; Sepulveda Caviedes, M.F.; McCarthy, R.; Cheetham, L.; Forbes, B.; Rhodin, M. Comparison of visual lameness scores to gait asymmetry in racing Thoroughbreds during trot in-hand. *Equine Vet. Educ.* **2020**, *32*, 191–198. [[CrossRef](#)]
22. May, S.A.; Wyn-Jones, G. Identification of hindleg lameness. *Equine Vet. J.* **1987**, *19*, 185–188. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
23. Dyson, S. Can lameness be graded reliably?: Can lameness be graded reliably? *Equine Vet. J.* **2011**, *43*, 379–382. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
24. Arkell, M.; Archer, R.M.; Guitian, F.J.; May, S.A. Evidence of bias affecting the interpretation of the results of local anaesthetic nerve blocks when assessing lameness in horses. *Vet. Rec.* **2006**, *159*, 346–348. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
25. Hattrisse, C.; Macaire, C.; Sapone, M.; Hebert, C.; Hanne-Poujade, S.; De Azevedo, E.; Marin, F.; Martin, P.; Chateau, H. Stance Phase Detection by Inertial Measurement Unit Placed on the Metacarpus of Horses Trotting on Hard and Soft Straight Lines and Circles. *Sensors* **2022**, *22*, 703. [[CrossRef](#)]
26. Pfau, T.; Witte, T.H.; Wilson, A.M. A method for deriving displacement data during cyclical movement using an inertial sensor. *J. Exp. Biol.* **2005**, *208*, 2503–2514. [[CrossRef](#)]
27. Oppong, F.B.; Agbedra, S.Y. Assessing Univariate and Multivariate Normality, A Guide For Non-Statisticians. *Math. Theory Model.* **2016**, *6*, 26–33.
28. Saporta, G. *Probabilités, Analyse des Données et Statistique*, 2nd ed.; révisée et augm.; Editions Technip: Paris, France, 2008; ISBN 978-2-7108-0814-5.

29. Power, M.; Fell, G.; Wright, M. Principles for high-quality, high-value testing. *Evid. Based Med.* **2013**, *18*, 5–10. [[CrossRef](#)]
30. Marunova, E.; Dod, L.; Witte, S.; Pfau, T. Smartphone-Based Pelvic Movement Asymmetry Measures for Clinical Decision Making in Equine Lameness Assessment. *Animals* **2021**, *11*, 1665. [[CrossRef](#)]
31. Hardeman, A.; Serra Braganca, F.M.; Koene, M.; Swagemakers, J.-H.; van Weeren, P.R.; Roepstorff, L. *Variation in Gait Symmetry Parameters in Sound Horses at Trot, on the Straight Line and on the Lunge*; Utrecht University: Utrecht, The Netherlands, 2018. [[CrossRef](#)]
32. Hardeman, A.M.; Egenvall, A.; Serra Bragança, F.M.; Koene, M.H.W.; Swagemakers, J.; Roepstorff, L.; Weeren, R.; Byström, A. Movement asymmetries in horses presented for prepurchase or lameness examination. *Equine Vet. J.* **2021**, evj.13453. [[CrossRef](#)]
33. Hopkins, S.; Pfau, T. Effect of Side of Handling on Movement Symmetry in Horses. *Equine Vet. J.* **2014**, *46*, 42. [[CrossRef](#)]
34. Serra Bragança, F.M.; Roepstorff, C.; Rhodin, M.; Pfau, T.; van Weeren, P.R.; Roepstorff, L. Quantitative lameness assessment in the horse based on upper body movement symmetry: The effect of different filtering techniques on the quantification of motion symmetry. *Biomed. Signal Process. Control* **2020**, *57*, 101674. [[CrossRef](#)]
35. Pfau, T.; Noordwijk, K.; Sepulveda Caviedes, M.F.; Persson-Sjodin, E.; Barstow, A.; Forbes, B.; Rhodin, M. Head, withers and pelvic movement asymmetry and their relative timing in trot in racing Thoroughbreds in training. *Equine Vet. J.* **2018**, *50*, 117–124. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
36. Audigié, F.; Pourcelot, P.; Degueurce, C.; Geiger, D.; Denoix, J.M. Fourier analysis of trunk displacements: A method to identify the lame limb in trotting horses. *J. Biomech.* **2002**, *35*, 1173–1182. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
37. Movement Symmetry of the Withers Can be Used to Discriminate Primary Forelimb Lameness From Compensatory Forelimb Asymmetry in Horses with Induced Lameness. *Equine Vet. J.* **2016**, *48*, 32–33. [[CrossRef](#)]
38. Pfau, T.; Jennings, C.; Mitchell, H.; Olsen, E.; Walker, A.; Egenvall, A.; Tröster, S.; Weller, R.; Rhodin, M. Lungeing on hard and soft surfaces: Movement symmetry of trotting horses considered sound by their owners: Movement symmetry on hard and soft surfaces on the lunge. *Equine Vet. J.* **2016**, *48*, 83–89. [[CrossRef](#)]

Article

Asymmetry Thresholds Reflecting the Visual Assessment of Forelimb Lameness on Circles on a Hard Surface

Claire Macaire ^{1,2,3} , Sandrine Hanne-Poujade ¹, Emeline De Azevedo ², Jean-Marie Denoix ², Virginie Coudry ², Sandrine Jacquet ², Lélia Bertoni ² , Amélie Tallaj ², Fabrice Audigié ², Chloé Hatrisse ², Camille Hébert ¹, Pauline Martin ¹, Frédéric Marin ³  and Henry Chateau ^{2,*} 

¹ Labcom LIM-ENVA, LIM France, 24300 Nontron, France; claire.macaire@vet-alfort.fr (C.M.)

² CIRALE, USC 957 BPLC, Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort, 94700 Maisons-Alfort, France

³ Laboratoire de BioMécanique et BioIngénierie (UMR CNRS 7338), Centre of Excellence for Human and Animal Movement Biomechanics (CoEMoB), Université de Technologie de Compiègne (UTC), Alliance Sorbonne Université, 60200 Compiègne, France

* Correspondence: henry.chateau@vet-alfort.fr

Simple Summary: Veterinary lameness examination commonly involves a visual evaluation of a horse trotting on a circle. Lameness detection can be aided by objective gait analysis, which is used to quantify the movement asymmetry of horses. However, the asymmetry thresholds defined for the trot on a straight line are not applicable to the circles because turning induces physiological asymmetric movement. Four Asymmetry Indices (AIs) were calculated to compare the vertical movement of the head and of the withers between the right limb movement and the left limb movement during a trot stride. This study aims to select the AIs with good discriminative power between a group of sound horses and a group of horses showing consistent unilateral lameness (grade > 1/10) across both circle directions (clockwise, counter clockwise) on a hard surface, and to define the optimal threshold value, based on sensitivity and specificity. Head vertical movement asymmetry showed the highest sensitivity and specificity to detect forelimb lameness when the lame limb was on the inside of the circle, while withers vertical movement asymmetry showed the highest sensitivity and specificity to detect forelimb lameness when the lame limb was on the outside of the circle.



Citation: Macaire, C.; Hanne-Poujade, S.; De Azevedo, E.; Denoix, J.-M.; Coudry, V.; Jacquet, S.; Bertoni, L.; Tallaj, A.; Audigié, F.; Hatrisse, C.; et al. Asymmetry Thresholds Reflecting the Visual Assessment of Forelimb Lameness on Circles on a Hard Surface. *Animals* **2023**, *13*, 3319. <https://doi.org/10.3390/ani13213319>

Academic Editors: Hilary Clayton and Lindsay St. George

Received: 24 August 2023

Revised: 20 October 2023

Accepted: 23 October 2023

Published: 25 October 2023



Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstract: The assessment of lameness in horses can be aided by objective gait analysis tools. Despite their key role of evaluating a horse at trot on a circle, asymmetry thresholds have not been determined for differentiating between sound and lame gait during this exercise. These thresholds are essential to distinguish physiological asymmetry linked to the circle from pathological asymmetry linked to lameness. This study aims to determine the Asymmetry Indices (AIs) with the highest power to discriminate between a group of sound horses and a group of horses with consistent unilateral lameness across both circle directions, as categorized by visual lameness assessment conducted by specialist veterinarians. Then, thresholds were defined for the best performing AIs, based on the optimal sensitivity and specificity. AIs were calculated as the relative comparison between left and right minima, maxima, time between maxima and upward amplitudes of the vertical displacement of the head and the withers. Except the AI of maxima difference, the head AI showed the highest sensitivity ($\geq 69\%$) and the highest specificity ($\geq 81\%$) for inside forelimb lameness detection and the withers AI showed the highest sensitivity ($\geq 72\%$) and the highest specificity ($\geq 77\%$) for outside forelimb lameness detection on circles.

Keywords: horse; lameness; symmetry; receiver operating characteristic curves; inertial measurement unit; circle

1. Introduction

The evaluation of equine locomotion during a trot on a circle represents an essential component of the veterinary lameness assessment [1]. Indeed, the need to produce cen-

tripetal force on a circle and the resulting body lean angle induce specific forces on the limb and 3D joint movements compared to the straight line, like a higher loading force on the outside limb, and collateromotion and axial rotation in the digital joints [1,2]. These specific biomechanical constraints on the anatomical structures are considered to be responsible for a different symptomatology between the circle and the straight line [2]. Therefore, this condition provides key information to aid clinical decision making [1].

Nowadays, the assessment of lameness can be aided by objective gait analysis tools [3–6]. Essential for the clinical application of these tools, asymmetry thresholds have been defined to distinguish between non-lame and lame gait [7–12]. McCracken et al. [13] have determined a threshold of 6 mm for the difference in the vertical displacement of the head between the right stance phase and left stance phase for defining forelimb lameness on a straight line. Pfau et al. [14] have established another value for this threshold of 14.5 mm using another objective gait analysis system and in the specific context of screening Thoroughbreds in race training. Lastly, asymmetry thresholds for indices normalized with the Range Of Movement (ROM) have been determined for discriminating visually assessed forelimb lameness on the straight line [15]. In this study, it was shown that the asymmetry of the upward movement of the withers had the highest power to discriminate between sound and forelimb-lame horses. The associated thresholds were $-7%$ asymmetry for left forelimb lameness and $+10%$ asymmetry for right forelimb lameness. These thresholds were expressed in percentage contrary to the previous thresholds expressed in millimeters [13,14], as relative values can be seen as a better way of facilitating comparisons between horses of different sizes and between objective gait analysis systems with different signal processing [16]. Moreover, time-related indices of head movement have proven to be affected by forelimb lameness on a straight line [17–19].

Asymmetry thresholds for lameness detection determined on a straight line are not applicable on a circle [20]. Yet, their usefulness in this circumstance of locomotion is all the more crucial as a large proportion of the movements recorded on the circle must be considered as physiologically asymmetric [11,12,20–22]. It is therefore essential to highlight the boundary between the physiological asymmetric movement of the circle and an excessive asymmetric movement which should be considered pathological. Asymmetries measured in sound horses during lunging at trot have shown variation higher than previously defined threshold values [11,12,20–22]. This variation could be due to factors such as speed, radius and body lean angle, which have been identified as impacting the measurements [23,24].

Thresholds for lameness detection on circles would help the interpretation of asymmetry values provided by an objective gait analysis tool during the entire locomotor examination. The objectives of this study were (i) to select asymmetry indices with the highest sensitivity and specificity to reflect the visual assessment of a veterinary specialist and then (ii) to define the optimal asymmetry thresholds for the inside and outside forelimb lameness detection on circles on a hard surface.

2. Materials and Methods

This clinical observational retrospective study was approved by the Clinical Research Ethics Committee (ComERC n°2022-01-19).

2.1. Horses and Conditions

This study was conducted on horses that presented at the Equine Clinic (CIRALE) of the National Veterinary College of Alfort (Maisons-Alfort, France) for locomotor evaluation from April 2019 to February 2023. After collecting the anamnesis and performing the inspection and the palpation of the locomotor system, the veterinarian evaluated the horse locomotion without warm-up. As part of the dynamic locomotor examination, horses were trotted by their owner/groom on the lunge on a circle of 8–14 m diameter, on the left rein (counter clockwise direction) and then on the right rein (clockwise direction). The ground surface was made of hard rubber pavers. Visual evaluation was performed by one of the five veterinary specialists who graduated as DESV (French certification as a specialist in

equine locomotor pathology) and were certified by the ISELP (International Society of Equine Locomotor Pathology).

In total, 574 horses were screened and were visually evaluated at lunge on the left rein and on the right rein on a hard surface. Among them, 95 horses showed left forelimb lameness (LF) and 122 horses showed right forelimb lameness (RF) on both reins. Horses showing a lameness grade of 1/10 or over 7/10 on a 0–10 grade scale equivalent to the UK scale (where 0 is sound and 10 is non-weight bearing lameness) on one rein were excluded [25–27]. After exclusion, 61 horses showed LF and 76 horses showed RF grade 2–7 lameness on both reins. Horses showing lameness on multiple limbs on one rein were excluded ($n = 8$). With these criteria, 57 horses showed LF lameness and 70 horses showed RF lameness on both reins. A flowchart is provided as a Supplementary Material (Figure S1). Lameness grades included in each group on both reins are summarized in Table 1.

Table 1. Number of horses showing lameness depending on the affected limb and the grade according to the 0–10 grade UK lameness scale. Mean \pm SD¹ of lameness grade in each lame horse group.

Horses	Rein	2/10	3/10	4/10	5/10	6/10	7/10	Total	Mean \pm SD ¹
Left forelimb lameness	Left rein (inside lameness)	18	8	23	3	4	1	57	3.5 \pm 1.4
	Right rein (outside lameness)	30	10	10	1	5	1	57	3.0 \pm 1.4
Right forelimb lameness	Left rein (outside lameness)	28	13	23	3	3	0	70	3.1 \pm 1.2
	Right rein (inside lameness)	23	14	19	5	8	1	70	3.5 \pm 1.4

SD¹—Standard Deviation.

Thirty-one horses were included in the group of “sound” horses according to the following criteria: (1) the horses were in training and judged by their owners to be capable of performing all the exercises required for their sport level; (2) three of the five veterinary specialists independently watched blinded videos of the horse at walk and at trot, on a hard circle on both reins and on a hard straight line and did not notice any locomotion abnormalities in the entire video (<1/10 lameness grade).

2.2. Data Collection

During the locomotor examination, as part of the clinical routine, horses were systematically equipped with the EQUISYM[®] system (Arioneo, LIM France, Le Bouscat, France), described by Macaire et al. and Timmerman et al. [15,28]. Data were recorded during approximately 20 s of trot per direction (clockwise/counterclockwise). The trot is of particular interest because a stride is composed of two diagonal beats whether on a straight line or circling to left or right.

2.3. Data Processing

The data were processed following the methods described by Macaire et al. [15]. Briefly, based on the vertical displacement of the head (_H) and the withers (_W) occurring along a stride, the following asymmetry indices (AIs), expressed as a percentage of the maximal range of motion within a stride, were used to compare the left vs. right part of the stride (Figure 1): AI-Min, AI-Max and AI-up. Additionally, AI-Tmax was calculated as a time-related index, representing the left–right difference in the duration of the down–up cycle (the time between the two maxima) of the vertical displacement occurring before and after the stance phase. AI-Tmax was expressed as a percentage of the maximal time between two consecutive maxima. A positive AI value indicated a smaller movement

amplitude or duration during the right stance than during the left stance, and a negative AI value indicated the opposite.

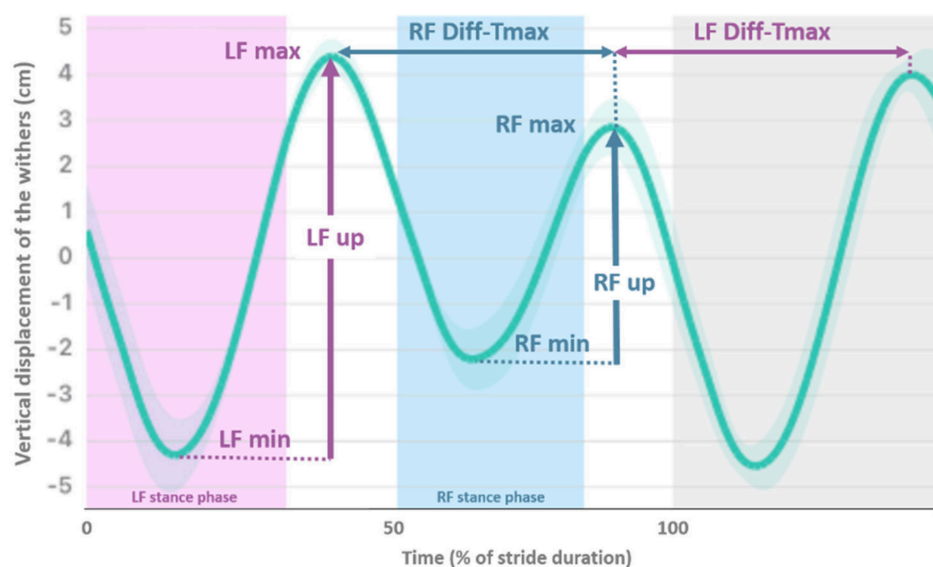


Figure 1. Mean vertical displacement (cm) of the withers plotted against time (expressed as percentage of stride duration) of a horse showing right forelimb (RF) lameness. Asymmetry Indices (AIs) are $AI\text{-min} = RF\text{min} - LF\text{min} / LF\text{up}$; $AI\text{-max} = LF\text{max} - RF\text{max} / LF\text{up}$; $AI\text{-up} = LF\text{up} - RF\text{up} / LF\text{up}$; and $AI\text{-Tmax} = LF\text{diffTmax} - RF\text{diffTmax} / LF\text{diffTmax}$. (LF—Left Forelimb).

2.4. Data Analysis

Descriptive analyses, including mean and standard deviation (SD), were calculated for each variable, for each group (sound/lame) and for each condition (clockwise/counterclockwise direction). The four AIs calculated from the head and the withers were analyzed using the same methods as those described by Macaire et al. [15]. Normality was assessed using a graphical method [29]. Receiver Operating Characteristic (ROC) curves were plotted to discriminate, respectively, the right and left forelimb lame group (RF, LF) from the control group (sound horses) at lunge separately on the left and on the right rein. The AIs' discriminative power is indicated by the Area Under Curve (AUC) of the ROC curve. Given that $AUC < 50\%$ indicates discrimination no better than chance, higher AUC values (closer to 100%) indicate higher discriminative power. Finally, thresholds of indices with good discriminative power were calculated. In this study, indices were considered as having good discriminative power if the sum of sensitivity and specificity was strictly higher than 150% [30].

3. Results

3.1. Descriptive Results

The 158 horses included were 78 geldings, 72 females and 8 stallions; 94 Selle Français, 8 Zangersheide, 7 Hanoverian, 6 Koninklijk Warmbloed Paardenstamboek Nederland (KWPN), 6 French riding pony and 37 other breeds; 113 showjumpers, 12 dressage, 10 eventing and 23 other disciplines; and they were aged from 3 to 20 years (mean \pm SD, 9 ± 3 years). Age, gender, breed and disciplines are detailed for each horse in the Supplementary Materials (Table S1). A mean \pm SD of 20.4 ± 7.2 trot strides, 22.9 ± 5.8 on the right rein and 17.9 ± 7.6 on the left rein, were processed for each recording. The stride duration was 0.79 ± 0.05 s on both reins, respectively, and 0.80 ± 0.04 s for sound horses, 0.79 ± 0.04 s for RF lame horses and 0.78 ± 0.05 s for LF lame horses. The AIs of the head, the withers and the pelvis are detailed for each included horse in the Supplementary Materials: Table S2 shows AIs and ROM values measured on the left rein and Table S3 shows AIs and ROM values measured on the right rein.

The mean ± SD for each AI and for each horse group are summarized in Table 2 and boxplots are displayed in Figure 2. In sound horses, AIs calculated from the head (AI-min_H, AI-max_H and AI-up_H) were negative on the left rein and positive on the right rein, reflecting a reduced vertical range of motion of the head during the inside forelimb stance phase. AI-min of the withers also showed a reduced minimum (AI-min_W) during the inside forelimb stance phase. On the contrary, AI-max of the withers was positive on the left rein and negative on the right rein, reflecting a reduced maximum after the outside forelimb stance phase. Finally, in sound horses, the AI-Tmax of the head and of the withers, and AI-up of the withers were close to 0% of asymmetry on both reins.

Table 2. Mean ± SD of asymmetry indices (AIs) of the head and the withers in sound, left forelimb (LF) lame, right forelimb (RF) lame horses trotting on right rein and on left rein circles.

Location	AI	Right Rein Circle			Left Rein Circle		
		LF	Sound	RF	LF	Sound	RF
Head (_H)	AI-min_H (%)	-29 ± 39	7 ± 18	47 ± 32	-49 ± 26	-8 ± 20	28 ± 36
	AI-max_H (%)	-6 ± 34	16 ± 17	24 ± 23	-22 ± 28	-10 ± 14	9 ± 27
	AI-up_H (%)	-27 ± 48	22 ± 24	61 ± 32	-63 ± 28	-18 ± 25	31 ± 44
	AI-Tmax_H (%)	-15 ± 23	3 ± 9	28 ± 25	-26 ± 17	-2 ± 10	15 ± 21
Withers (_W)	AI-min_W (%)	0 ± 22	19 ± 10	36 ± 20	-28 ± 24	-14 ± 11	4 ± 18
	AI-max_W (%)	-26 ± 16	-17 ± 12	-8 ± 16	15 ± 22	18 ± 8	26 ± 13
	AI-up_W (%)	-26 ± 25	2 ± 12	27 ± 22	-13 ± 21	4 ± 14	31 ± 19
	AI-Tmax_W (%)	-7 ± 9	0 ± 3	6 ± 9	-4 ± 9	0 ± 3	7 ± 6

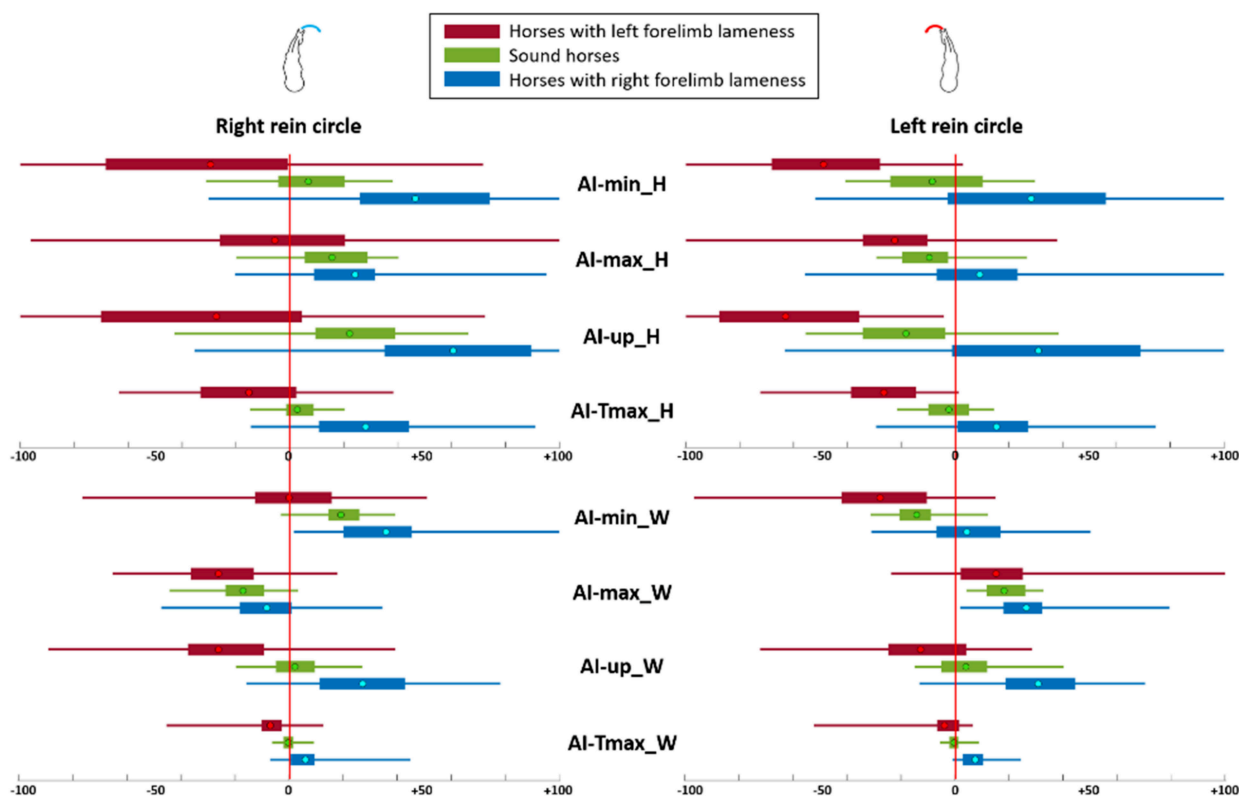


Figure 2. Boxplots of Asymmetry Indices (AIs) in percentage for sound horses and horses with a left forelimb lameness and right forelimb lameness. The dot represents the mean, the two extremities of the box are 25th and 75th percentiles, and extremities of the whiskers represent the minimum and maximum. A negative value reflects reduced movement or duration during the left limb stance, and positive value reflects reduced movement or duration during the right limb stance.

RF-lame horses showed higher mean values (sign of reduced movement on the right) than sound horses for all AIs of the head and withers. On the opposite hand, LF-lame horses showed lower mean values than sound horses for all AIs of the head and withers.

Horses with RF and LF lameness showed, respectively, positive and negative mean values (sign of reduced movement during the stance of the lame limb) for all AIs, except AI-max_W, when the lame limb was on the inside of the circle (RF at right rein and LF at left rein). When the lame limb was on the outside of the circle, AI-min_W was close to 0% of asymmetry.

3.2. Discrimination between Lame Horses with the Lame Forelimb on the Inside of the Circle and Sound Horses

ROC curves and associated results for the discrimination of forelimb lameness when the lame limb was on the inside of the circle (RF lameness on right rein and LF lameness on left rein) from sound horses are presented in Figure 3 and Table 3, respectively. The lowest AUC (lowest discrimination performance) value for the inside lameness detection was shown by the AI-max for the head ($AUC \leq 70\%$) and by the AI-max for the withers ($AUC \leq 67\%$). The indices with the highest AUC ($AUC \geq 83\%$) were in the following descending order: AI-min_H, AI-Tmax_H and AI-up_H for RF lameness on the right rein. For LF lameness on the left rein, the indices with the highest AUC ($AUC \geq 87\%$) were in the following descending order: AI-Tmax_H, AI-min_H and AI-up_H.

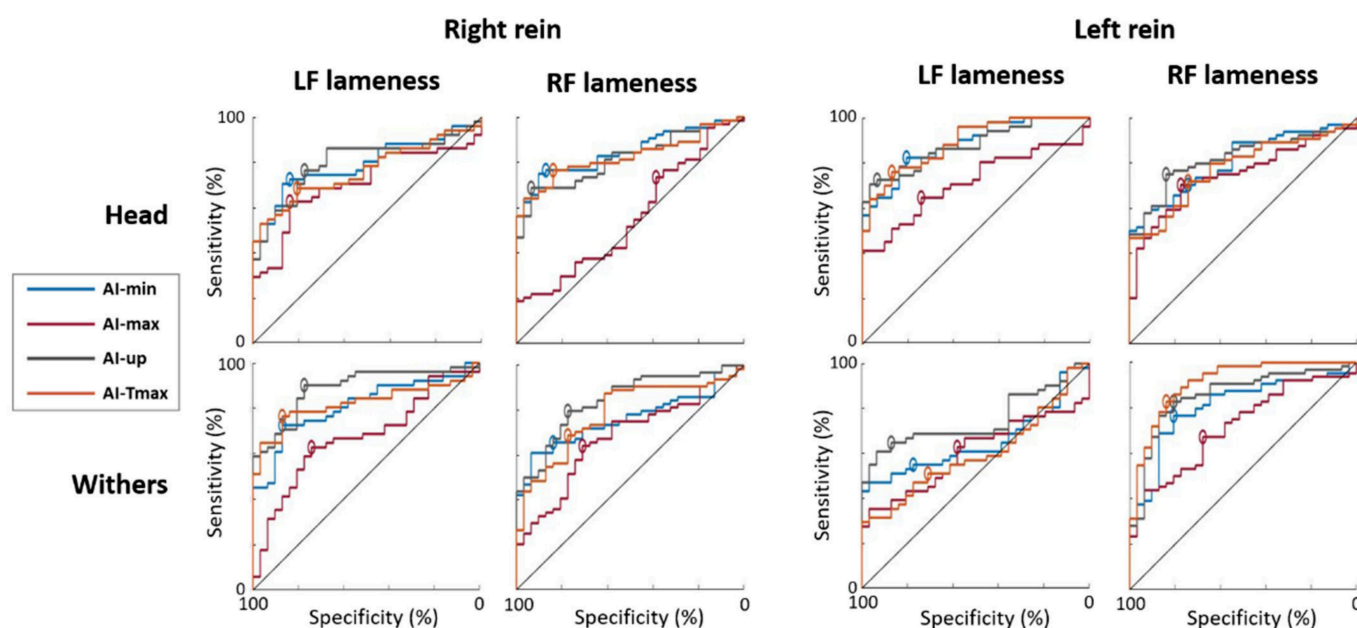


Figure 3. Receiver Operating Characteristic (ROC) curves discriminating horses with a constant Left Forelimb (LF) lameness from sound horses; and discriminating horses with a constant Right Forelimb (RF) lameness from sound horses, plotted for both reins on a circle. Tested Asymmetry Indices were AI-min (blue), AI-max (red), AI-up (grey) and AI-Tmax (orange). The highest specificity and sensitivity point of each curve is represented by a circle (top-left method). The black line is the hypothesized ROC curve with discriminative power only due to chance.

Table 3. Area Under the Curve (AUC) of the Receiver Operating Characteristic (ROC) curve discriminating forelimb lameness when the lame limb was on the inside of the circle from sound horses on circles, for each of the Asymmetry Indices (AIs). The highest sensitivity (Se), specificity (Sp) and associated threshold (Threshold) were calculated using the top-left method of ROC analysis. The 95% confidence intervals [;] were calculated by using a Bootstrap method, plotting ROC analysis on 400 population resamplings. Results for which the sum of sensitivity and specificity is over 150% for both circles (left and right reins) are in bold.

AI	Left Forelimb Lameness on the Left Rein (Inside Lameness on the Left Rein)				Right Forelimb Lameness on the Right Rein (Inside Lameness on the Right Rein)			
	AUC	Se	Sp	Threshold	AUC	Se	Sp	Threshold
AI-min_H (%)	89 [83;94]	82 [72;94]	81 [65;90]	−25 [−30;−17]	86 [78;92]	79 [70;89]	87 [75;96]	23 [18;27]
AI-max_H (%)	70 [60;80]	63 [47;76]	74 [57;89]	−17 [−25;−10]	57 [45;69]	74 [66;100]	39 [2;39]	9 [−11;12]
AI-up_H (%)	87 [80;93]	72 [56;80]	94 [82;100]	−49 [−71;−37]	83 [74;90]	69 [54;78]	94 [84;100]	49 [41;65]
AI-Tmax_H (%)	90 [83;96]	79 [66;88]	87 [76;98]	−14 [−19;−11]	84 [76;91]	79 [70;90]	84 [71;95]	10 [6;12]
AI-min_W (%)	66 [54;76]	53 [37;61]	87 [74;100]	−24 [−33;−19]	76 [67;86]	66 [52;77]	84 [69;97]	27 [24;32]
AI-max_W (%)	60 [49;73]	61 [46;83]	58 [23;71]	17 [11;25]	67 [56;77]	64 [48;74]	71 [56;88]	−11 [−15;−4]
AI-up_W (%)	76 [65;85]	67 [54;79]	81 [63;88]	−8 [−12;−3]	84 [76;91]	80 [69;92]	77 [62;88]	10 [4;14]
AI-Tmax_W (%)	61 [49;71]	60 [49;78]	61 [33;71]	−1 [−2;1]	79 [67;88]	67 [36;76]	77 [66;99]	2 [1;5]

3.3. Discrimination between Lame Horses with the Lame Forelimb on the Outside of the Circle and Sound Horses

The ROC curves and associated results for the discrimination of forelimb lameness when the lame limb was on the outside of the circle (LF lameness on right rein and RF lameness on left rein) from sound horses are presented in Figure 3 and in Table 4, respectively. The lowest AUC value for the outside lameness detection on the circle was shown by AI-max for the withers (AUC ≤ 71%) and by AI-max for the head (AUC ≤ 75%). The indices with the highest AUC (AUC ≥ 79%) were in the following descending order, AI-up_W, AI-Tmax_W, AI-up_H and AI-min_W, for LF lameness on the right rein. For RF lameness on the left rein, the indices with the highest AUC (AUC ≥ 81%) were in the following descending order: AI-Tmax_W, AI-up_W, AI-up_H and AI-min_W.

Table 4. Area Under the Curve (AUC) of the Receiver Operating Characteristic (ROC) curve discriminating forelimb lameness when the lame limb was on the outside of the circle from sound horses on circles, for each of the Asymmetry Indices (AIs). The highest sensitivity (Se), specificity (Sp) and associated threshold (Threshold) were calculated using the top-left method of ROC analysis. The 95% confidence intervals [;] were calculated by using a Bootstrap method, plotting ROC analysis on 400 population resamplings. Results for which the sum of sensitivity and specificity is over 150% for both circles (left and right reins) are in bold.

AI	Left Forelimb Lameness on the Right Rein (Outside Lameness on the Right Rein)				Right Forelimb Lameness on the Left Rein (Outside Lameness on the Left Rein)			
	AUC	Se	Sp	Threshold	AUC	Se	Sp	Threshold
AI-min_H (%)	79 [69;88]	70 [57;79]	84 [71;95]	−8 [−17;−1]	80 [73;88]	66 [45;75]	81 [63;98]	13 [0;34]
AI-max_H (%)	72 [60;82]	65 [50;75]	84 [73;99]	1 [−9;6]	75 [65;83]	70 [57;81]	77 [64;91]	−2 [−7;6]
AI-up_H (%)	81 [71;90]	77 [62;89]	77 [61;89]	7 [−9;22]	82 [74;89]	74 [62;81]	84 [73;97]	0 [−9;11]
AI-Tmax_H (%)	75 [65;85]	67 [55;79]	81 [65;91]	−3 [−7;4]	77 [68;85]	71 [57;82]	74 [59;88]	3 [−2;7]
AI-min_W (%)	79 [71;89]	72 [60;82]	87 [75;99]	13 [11;15]	81 [72;89]	76 [63;86]	81 [66;94]	−7 [−12;−1]
AI-max_W (%)	68 [57;79]	63 [49;75]	74 [59;88]	−23 [−28;−19]	71 [60;82]	66 [50;81]	68 [48;83]	22 [17;27]
AI-up_W (%)	88 [81;95]	89 [81;100]	77 [60;85]	−5 [−9;1]	86 [78;93]	83 [73;94]	81 [65;89]	13 [5;17]
AI-Tmax_W (%)	81 [73;90]	74 [61;83]	87 [76;99]	−3 [−4;−3]	91 [86;97]	84 [72;93]	84 [71;94]	2 [1;3]

3.4. Asymmetry Thresholds of Reliable Indices

For discriminating sound horses from lame horses with the lame limb on the inside of the circle, the indices with high sensitivity and specificity (sum of sensitivity and specificity greater than 150%) were three indices from the head (AI-up_H, AI-Tmax_H and AI-min_H). For discriminating forelimb lameness when the lame limb was on the outside of the circle,

the indices with greater sensitivity and specificity were three indices from the withers (AI-up_W, AI-Tmax_W and AI-min_W) and one from the head (AI-up_H).

Figure 4 represents the thresholds and their 95% CI associated with a sum of sensitivity and specificity over 150% for inside (Figure 4a) and outside (Figure 4b) lameness discrimination on both reins.

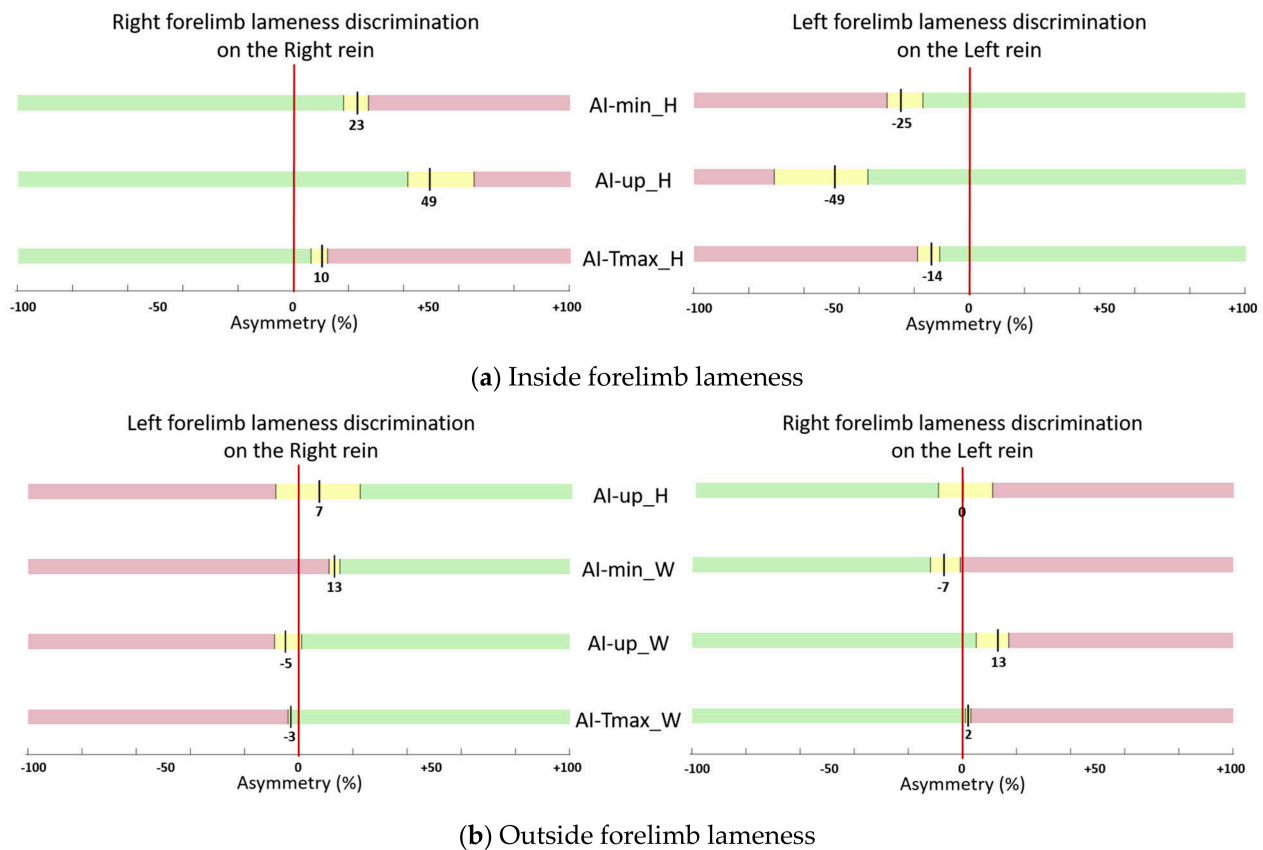


Figure 4. Thresholds (black line) of Asymmetry Indices (AIs) (in percentage of asymmetry) for lameness discrimination when the lame limb was on the inside of the circle (a) and when the lame limb was on the outside of the circle (b). Only the AIs with the sum of sensitivity and specificity over 150% for both right and left reins are plotted. Three ranges of values are represented: yellow for 95% confidence interval (95% CI) around the threshold, green for values below the 95% CI (“sound” horses) and red for values beyond the 95% CI (“lame” horses).

When comparing the absolute values of left rein and right rein thresholds for lameness discrimination when the lame limb was on the inside of the circle, the maximum difference between right and left rein was 4% of asymmetry for AI-Tmax_H (Figure 4a). When the lame limb was on the outside of the circle, the maximum difference between right and left was 8% of asymmetry for AI-up_W (Figure 4b).

4. Discussion

Asymmetry Indices (AIs) measured on sound horses showed a reduced head and withers movement during the inside forelimb stance phase, except for the AI-max of the withers. This goes with a larger downward movement of the trunk and head towards the outside forelimb, confirming the results of previous studies [12,22]. This physiological asymmetry observed on the circle means that we need to define the limit between a physiological asymmetry and an asymmetry that is amplified (or reduced) when a pathological phenomenon is superimposed.

Our study confirms the hypothesis that head and withers vertical displacements are indicators of forelimb lameness on the circle in a specific group of horses showing

single-limb lameness on both reins, excluding a lameness grade of 1/10. In addition, the present study reveals that when the lame limb is inside the circle, head movements have the highest discriminative power. Conversely, when the lame limb is outside the circle, withers movements have the highest discriminative power. Practically, the AI-min and AI-Tmax of the head discriminated forelimb lameness when the lame limb was on the inside of the circle with the highest sensitivity ($\geq 79\%$) and specificity ($\geq 81\%$) on both reins. AI-up and AI-Tmax of the withers discriminated forelimb lameness when the lame limb was on the outside of the circle with the highest sensitivity ($\geq 83\%$ and $\geq 74\%$, respectively) and specificity ($\geq 77\%$ and $\geq 84\%$, respectively) on both reins.

Among the four indices (AI-min, AI-max, AI-up and AI-Tmax) used in this study, AI-max has systematically the lowest sensitivity and specificity for discriminating horses showing forelimb lameness on both reins from sound horses on a circle. In contrast, a previous study measured a reduced maximum altitude of the head after outside forelimb lameness induction [21]. There are several possible explanations for this discrepancy. On the one hand, the reference population for the two studies is not identical since we chose to concentrate on the lameness visible on both clockwise and counter clockwise circles. On the other hand, the type of lameness analyzed in the study by Rhodin et al. [21] was induced lameness (with a modified horseshoe) and not spontaneous lameness as in the present study.

Several studies describe variation in asymmetry but did not reach a consensus on the physiological asymmetry of sound horses induced by the circle [11,12,21,22]. Rhodin et al. [21] concluded a reduced head movement for the outside forelimb (HDmin). In 2016, Rhodin et al. [22] highlighted a non-uniform effect of the circle on the head. Other studies [11,12] showed results similar to those of the present study concerning physiological head asymmetry on a circle with a reduced head movement during the inside forelimb stance. The recorded asymmetries of the withers vertical displacements on sound horses trotting on a circle are consistent with a previous study [12] and showed a lowered minimum during and a reduced maximum after the stance phase of the outside forelimb. However, in the studies of Starke et al. [12] and Rhodin et al. [22], the inclusion criteria were based on the straight line and did not exclude visible lameness on the circle, meaning that some of the recorded asymmetries in their studies could be due to the apparition of a lameness on the circle that was not visible on the straight line.

Studies agree that forelimb lameness induces a reduced downward movement of the head (AI-min) during the stance phase of the lame limb [10,11,21,31], particularly for the inside lame limb when trotting on a circle [11,21,32]. The importance of the head movements for detecting the inside lameness and the withers for the outside lameness, as observed here, has been mentioned in the detailed results of a linear discriminant analysis discriminating positive and negative anesthesia realized by Pfau et al. [32]. They revealed that the minimum and upward movement asymmetry of the withers were the features with the most important weight to discriminate the anesthesia effect on the outside limb in circles on a hard surface, respectively, in each canonical discriminate function. Also, the minimum altitude of the head had the most important weight for the inside limb in the first canonical discriminate function. Marunova et al. [33], without the separation of outcomes from the inside and the outside limbs, measured significant differences in the head asymmetry indices and an upward withers asymmetry index before and after positive anesthesia.

No thresholds were previously determined for the locomotion on circles, allowing only comparisons with straight lines. For discriminating sound horses from lame horses with the lame limb on the inside of the circle, thresholds of head amplitude asymmetry (AI-up_H) showed higher values (-49% and $+49\%$ for respectively LF and RF lame limb) than thresholds for discriminating sound horses from lame horses established using similar methods on a straight line (-36% and $+24\%$ for respectively LF and RF lame limb) [15]. Conversely, thresholds of AI-up_H established for discriminating sound horses from lame horses with the lame limb on the outside of the circle showed lower values ($+7\%$

and 0% for respectively LF and RF lame limb) than thresholds for discriminating sound horses from lame horses on a straight line (−36 and +24% for respectively LF and RF lame limb) [15]. This difference underlines the absolute need to take into account the physiological asymmetry induced by the circle on the head movements. In contrast, thresholds of withers amplitude asymmetry (AI-up_W) were less influenced by movement on the circle when the lame limb was on the outside (−5% and +13%, for respectively LF and RF lame limb, on the circle compared to −10% and +7%, for respectively LF and RF lame limb, on a straight line) [15].

The results obtained also demonstrate that, on the circle, the values of certain indices must be considered abnormal when they are equal to 0% (perfect symmetry between right and left). For example, when the index of the minimum withers height (AI-min_W) is equal to zero on a circle, this result indicates lameness on the limb outside the circle. An analysis of the symmetry indices on the circle must therefore take account of this shift in relation to what is expected on the straight line. This information is also useful for the clinician, who should consider that perfect symmetry on the circle could be interpreted as suspicious, as physiological asymmetry is to be expected.

In our study population, it appeared that the average grades attributed by the veterinary specialist to the inside forelimb lameness were slightly higher than the grade attributed to outside forelimb lameness. Means of lameness grade were indeed 3.5/10 for the inside forelimb and 3.1/10 for the outside forelimb. One hypothesis could be that injuries affecting the included horses were more painful for the inside limb than for the outside limb [1]. This could be a result of greater collateromotion and axial rotation movements in the inside limb than in the outside limb [1]. But, it should first and foremost be remembered that the main manifestation of an inside lameness is on the head, leading to a possible overestimation of lameness with an obvious head nod compared to a withers asymmetry [34].

In the present study, AIs were divided by the ROM to obtain relative indices expressed as a percentage. ROM values in centimeters are also provided in Table S2 for the locomotion on the right rein and in Table S3 for the locomotion on the left rein, meaning that the absolute value differences between the right and left limbs in centimeters can be easily recalculated using the formula $AI(\%) \times ROM(\text{cm})/100$. However, normalizing values seems sensible in order to compare movements measured in a heterogeneous population, including individuals of different sizes (from pony to large horse) with varying vertical amplitudes of gaits. In addition, IMU systems differ in how they process accelerometric signals into displacement and this affects the threshold values that are used across systems [16]. Normalization can facilitate the comparison of asymmetry indices processed by different gait analysis systems, as suggested by Hardeman et al. [35].

In this study, an index based on temporal pattern asymmetry was used. AI-Tmax, reflecting a difference in duration of the down–up cycle between the right and left stance, showed a discriminative power as high as the amplitude asymmetry of the head and the withers. The results showed a reduction in the duration of the down–up cycle (time between two maxima) during the stance phase of the lame limb. Asymmetry indices based on Fourier transform have been shown to be indicators of lameness [17–19]. Also, Pfau et al. [36] found that the relative timing of the head movements compared to the withers or the pelvis was also an indicator of lameness. This underlines the importance of these temporal variables in the identification and analysis of lameness.

Horses were included in this study if they were lame on both reins. This selection criterion represents a unique subgroup of lameness cases, showing a specific manifestation. This choice has been made in order to guarantee unambiguous lameness under circle conditions, and in order to study the locomotion of the same horses whether they turn on the right rein or on the left rein. Otherwise, the locomotion of lame horses on the right rein would not be the locomotion of the lame horses, which were studied on the left rein. On the contrary, the group of sound horses would remain unchanged between the two reins, even though they are the reference group for comparison.

A well-known limitation of this study is the clinical reference used to distinguish lame horses from non-lame horses considering that visual clinical assessment is recognized by definition as being subjective [37,38]. This is a deliberate choice. Visual assessment is not considered here as a “gold standard” but only as a reference to what exists in the best possible conditions in order for clinicians to appropriate the tools for quantifying locomotor asymmetries compared to what they are used to seeing and concluding subjectively with the classical (even imperfect) methods. This is a key issue for “calibrating” these new quantitative tools and ensuring that the slightest asymmetry recorded by the machine is not wrongly considered to be an expression of lameness, particularly in the circle. However, in order to minimize the limits of subjective examination, the veterinarians chosen in this study were highly experienced and trained in the same clinic. These factors have been shown to improve agreement between vets [31,36]. Confounding specialists and unexperienced vets, a 69% agreement between veterinarians was reached on forelimb lameness detection on circles [31]. Moreover, the lowest grade of lameness (1/10) was excluded because of weaker agreement for very subtle asymmetries [38], and sound horses were included based on the agreement of three veterinary specialists in order to decrease uncertainty [34]. The strict selection criterion resulted in a sample that only represents a proportion of lameness cases. This choice was made in order to study unambiguous and simple lameness cases as a first step.

This study aims to investigate spontaneous cases of lameness of various origins. However, it is obvious that lameness can have different clinical expression depending on the type of injury [1,39]. Circles may further reveal lameness unseen on the straight line [1,2,26]. Some indices may be modified according to the type of injury. More horses with specific types of injuries should be included to go further in this direction.

Other limitations induced by circles were the radius, speed and body lean angle. The diameter of the circle was imposed with a standardized examination area. However, these factors are difficult to control precisely in practice. Yet, they have been shown to affect the symmetry [9,24], although the relationship between asymmetry and body lean angle has been considered unpredictable [40].

5. Conclusions

This study established preliminary thresholds for the clinical interpretation of asymmetry indices when the horses lunged at trot on short circles under clinical examination conditions for simple limb lameness shown on both reins with a grade over 1/10. For discriminating sound horses from lame horses with the lame forelimb on the inside of the circle, the asymmetry thresholds were approximatively (average between right and left absolute values) 24% and 49% for, respectively, the minimum and the amplitude of the elevation of the head, and 12% for the temporal phase shift of the head. For discriminating sound horses from lame horses with the lame forelimb on the outside of the circle, the asymmetry thresholds were approximatively (average between right and left absolute values) 10% and 9% for, respectively, the minimum and amplitude of elevation of the withers, and 2.5% for the temporal phase shift of the withers.

The results confirmed that circles on a hard surface induce the asymmetry of movements in sound horses. This asymmetry should not be confused with lameness, making the notion of threshold particularly important in this circumstance of the locomotion. In this study, asymmetry of the head movements was shown to be more effective to discriminate forelimb lameness when the lame limb was on the inside of the circle (sensitivity $\geq 69\%$ and specificity $\geq 81\%$), whereas asymmetry of the withers movements was shown to be more effective to discriminate lameness when the lame limb was on the outside of the circle (sensitivity $\geq 72\%$ and specificity $\geq 77\%$). The temporal asymmetry between the left and right duration of the vertical displacement cycle of the head or of the withers showed a discriminative power as high as asymmetry indices calculated from the amplitude of the vertical displacements. These quantitative results are useful in objectively helping clinicians to establish an informed diagnosis. In the future, these thresholds will be refined

by including more horses and will be specific to the anatomical location and to the type of lesion responsible for the lameness. Indeed, this study needs to be extended by adding horses with different lameness types and horses that show lameness on only one rein. Also, horses with subtle lameness (1/10 grade) have not been included here, considering that the level of agreement between clinicians for very subtle asymmetries is low [23]. However, further studies will be needed to refine thresholds for those more subtle and uncertain cases. In addition, the investigation should be extended to the detection of hindlimb lameness and to circles on a soft surface.

Supplementary Materials: The following supporting information can be downloaded at <https://www.mdpi.com/article/10.3390/ani13213319/s1>, Figure S1: Flowchart of the exclusion/inclusion criteria of the screened horses, which were visually considered lame at lunge on both reins on a hard surface by a veterinary specialist during his routine practice. Table S1: Table of detailed breed, age, discipline and gender of each included horse. “Other” is written for the rare mentions. Table S2: Table of detailed data measured on the head, the withers and the pelvis of each horse on the left rein. These include the horse identity; the group and the grade of lameness assigned by the veterinarian; the studied Asymmetric Indices (AI-up; AI-min; AI-max; AI-Tmax); the range of movement (maximum amplitude); and the stride duration averaged over all strides. Table S3: Table of detailed data measured on the head, the withers and the pelvis of each horse on the right rein. These include the horse identity; the group and the grade of lameness assigned by the veterinarian; the studied Asymmetric Indices (AI-up; AI-min; AI-max; AI-Tmax); the range of movement (maximum amplitude); and the stride duration averaged over all strides.

Author Contributions: Conceptualization, C.M., F.M., P.M. and H.C.; methodology, C.M., S.H.-P., F.M., P.M. and H.C.; software, C.M., S.H.-P., C.H. (Chloé Hatrisse) and C.H. (Camille Hébert); validation, C.M., S.H.-P., E.D.A. and C.H. (Camille Hébert); formal analysis, C.M. and S.H.-P.; investigation, E.D.A., J.-M.D., V.C., S.J., L.B. and A.T.; resources, E.D.A., J.-M.D., V.C., S.J., L.B., A.T., F.A., C.H. (Camille Hébert) and P.M.; data curation, C.M. and E.D.A.; writing—original draft preparation, C.M.; writing—review and editing, S.H.-P., F.A., F.M., P.M. and H.C.; visualization, C.M.; supervision, F.M., P.M. and H.C.; project administration, P.M. and H.C.; funding acquisition, P.M. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by the Agence Nationale de la Recherche (LabCom “CWDVetlab”, Contract ANR 16-LCV2-0002-01), the European Regional Development Fund (FEDER) and the Region Normandie (Project “EquiSym”, Contract 20E01636).

Institutional Review Board Statement: The animal study protocol was approved by the Ethics Committee of COMITE D’ETHIQUE EN RECHERCHE CLINIQUE—ComERC (n°2022-01-19).

Informed Consent Statement: Informed consent was obtained from the owner of all the subjects involved in the study.

Data Availability Statement: The data that support the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

Acknowledgments: The authors thank the Centre d’Imagerie et de Recherche sur les Affections Locomotrices Equines (CIRALE). They also thank Alexandre Charles, Anne-Claire Idoux, Antoinette Terlinden and Alberto De la Rocha who actively contributed to data collection.

Conflicts of Interest: The project was supported by the Agence Nationale de la Recherche (ANR) which sponsors a collaborative project between a company (LIM France) and the Ecole Nationale Vétérinaire d’Alfort (ENVA).

References

1. Denoix, J.M. A Look at Lameness Through the Eyes of Functional Anatomy (and Biomechanics). *AAEP Proc.* **2021**, *67*, 106–133.
2. Chateau, H.; Camus, M.; Holden-Douilly, L.; Falala, S.; Ravary, B.; Vergari, C.; Lepley, J.; Denoix, J.-M.; Pourcelot, P.; Crevier-Denoix, N. Kinetics of the forelimb in horses circling on different ground surfaces at the trot. *Vet. J.* **2013**, *198*, e20–e26. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
3. Serra Bragança, F.M.; Rhodin, M.; van Weeren, P.R. On the brink of daily clinical application of objective gait analysis: What evidence do we have so far from studies using an induced lameness model? *Vet. J.* **2018**, *234*, 11–23. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

4. Weeren, P.R.; Pfau, T.; Rhodin, M.; Roepstorff, L.; Serra Bragança, F.; Weishaupt, M.A. Do we have to redefine lameness in the era of quantitative gait analysis? *Equine Vet. J.* **2017**, *49*, 567–569. [[CrossRef](#)]
5. Weeren, P.R.; Pfau, T.; Rhodin, M.; Roepstorff, L.; Serra Bragança, F.; Weishaupt, M.A. What is lameness and what (or who) is the gold standard to detect it? *Equine Vet. J.* **2018**, *50*, 549–551. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
6. Pfau, T.; Fiske-Jackson, A.; Rhodin, M. Quantitative assessment of gait parameters in horses: Useful for aiding clinical decision making? *Equine Vet. Educ.* **2016**, *28*, 209–215. [[CrossRef](#)]
7. Reed, S.K.; Kramer, J.; Thombs, L.; Pitts, J.B.; Wilson, D.A.; Keegan, K.G. Comparison of results for body-mounted inertial sensor assessment with final lameness determination in 1224 equids. *J. Am. Vet. Med. Assoc.* **2020**, *256*, 590–599. [[CrossRef](#)]
8. Kallerud, A.S.; Hernlund, E.; Byström, A.; Persson-Sjodin, E.; Rhodin, M.; Hendrickson, E.H.S.; Fjordbakk, C.T. Non-banked curved tracks influence movement symmetry in two-year-old Standardbred trotters. *Equine Vet. J.* **2021**, *53*, 1178–1187. [[CrossRef](#)]
9. Pfau, T.; Persson-Sjodin, E.; Gardner, H.; Orssten, O.; Hernlund, E.; Rhodin, M. Effect of Speed and Surface Type on Individual Rein and Combined Left–Right Circle Movement Asymmetry in Horses on the Lunge. *Front. Vet. Sci.* **2021**, *8*, 692031. [[CrossRef](#)]
10. Rhodin, M.; Egenvall, A.; Haubro Andersen, P.; Pfau, T. Head and pelvic movement asymmetries at trot in riding horses in training and perceived as free from lameness by the owner. *PLoS ONE* **2017**, *12*, e0176253. [[CrossRef](#)]
11. Pfau, T.; Jennings, C.; Mitchell, H.; Olsen, E.; Walker, A.; Egenvall, A.; Tröster, S.; Weller, R.; Rhodin, M. Lungeing on hard and soft surfaces: Movement symmetry of trotting horses considered sound by their owners: Movement symmetry on hard and soft surfaces on the lunge. *Equine Vet. J.* **2016**, *48*, 83–89. [[CrossRef](#)]
12. Starke, S.D.; Willems, E.; May, S.A.; Pfau, T. Vertical head and trunk movement adaptations of sound horses trotting in a circle on a hard surface. *Vet. J.* **2012**, *193*, 73–80. [[CrossRef](#)]
13. McCracken, M.J.; Kramer, J.; Keegan, K.G.; Lopes, M.; Wilson, D.A.; Reed, S.K.; LaCarrubba, A.; Rasch, M. Comparison of an inertial sensor system of lameness quantification with subjective lameness evaluation: Comparison of inertial system with subjective lameness evaluation. *Equine Vet. J.* **2012**, *44*, 652–656. [[CrossRef](#)]
14. Pfau, T.; Sepulveda Caviedes, M.F.; McCarthy, R.; Cheetham, L.; Forbes, B.; Rhodin, M. Comparison of Visual Lameness Scores to Gait Asymmetry in Racing Thoroughbreds during Trot In-hand. *Equine Vet. Educ.* **2020**, *32*, 191–198. [[CrossRef](#)]
15. Macaire, C.; Hanne-Poujade, S.; Azevedo, E.D.; Denoix, J.-M.; Coudry, V.; Jacquet, S.; Bertoni, L.; Tallaj, A.; Audigié, F.; Hattrisse, C.; et al. Investigation of Thresholds for Asymmetry Indices to Represent the Visual Assessment of Single Limb Lameness by Expert Veterinarians on Horses Trotting in a Straight Line. *Animals* **2022**, *12*, 3498. [[CrossRef](#)]
16. Pfau, T.; Boulbee, H.; Davis, H.; Walker, A.; Rhodin, M. Agreement between Two Inertial Sensor Gait Analysis Systems for Lameness Examinations in Horses. *Equine Vet. Educ.* **2016**, *28*, 203–208. [[CrossRef](#)]
17. Audigié, F.; Pourcelot, P.; Degueurce, C.; Geiger, D.; Denoix, J.M. Fourier analysis of trunk displacements: A method to identify the lame limb in trotting horses. *J. Biomech.* **2002**, *35*, 1173–1182. [[CrossRef](#)]
18. Kramer, J.; Keegan, K.G.; Kelmer, G.; Wilson, D.A. Objective determination of pelvic movement during hind limb lameness by use of a signal decomposition method and pelvic height differences. *Am. J. Vet. Res.* **2004**, *65*, 741–747. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
19. Keegan, K.G.; Arafat, S.; Skubic, M.; Wilson, D.A.; Kramer, J. Detection of lameness and determination of the affected forelimb in horses by use of continuous wavelet transformation and neural network classification of kinematic data. *Am. J. Vet. Res.* **2003**, *64*, 1376–1381. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
20. Hardeman, A.M.; Serra Bragança, F.M.; Swagemakers, J.H.; Weeren, P.R.; Roepstorff, L. Variation in gait parameters used for objective lameness assessment in sound horses at the trot on the straight line and the lunge. *Equine Vet. J.* **2019**, *51*, 831–839. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
21. Rhodin, M.; Pfau, T.; Roepstorff, L.; Egenvall, A. Effect of lungeing on head and pelvic movement asymmetry in horses with induced lameness. *Vet. J.* **2013**, *198*, e39–e45. [[CrossRef](#)]
22. Rhodin, M.; Roepstorff, L.; French, A.; Keegan, K.G.; Pfau, T.; Egenvall, A. Head and pelvic movement asymmetry during lungeing in horses with symmetrical movement on the straight. *Equine Vet. J.* **2016**, *48*, 315–320. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
23. Greve, L.; Pfau, T.; Dyson, S. Alterations in body lean angle in lame horses before and after diagnostic analgesia in straight lines in hand and on the lunge. *Vet. J.* **2018**, *239*, 1–6. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
24. Pfau, T.; Stubbs, N.C.; Kaiser, L.J.; Brown, L.E.A.; Clayton, H.M. Effect of trotting speed and circle radius on movement symmetry in horses during lunging on a soft surface. *Am. J. Vet. Res.* **2012**, *73*, 1890–1899. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
25. May, S.A.; Wyn-Jones, G. Identification of hindleg lameness. *Equine Vet. J.* **1987**, *19*, 185–188. [[CrossRef](#)]
26. Dyson, S. Can lameness be graded reliably? Can lameness be graded reliably? *Equine Vet. J.* **2011**, *43*, 379–382. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
27. Arkell, M.; Archer, R.M.; Guitian, F.J.; May, S.A. Evidence of bias affecting the interpretation of the results of local anaesthetic nerve blocks when assessing lameness in horses. *Vet. Rec.* **2006**, *159*, 346–348. [[CrossRef](#)]
28. Timmerman, I.; Macaire, C.; Hanne-Poujade, S.; Bertoni, L.; Martin, P.; Marin, F.; Chateau, H. A Pilot Study on the Inter-Operator Reproducibility of a Wireless Sensors-Based System for Quantifying Gait Asymmetries in Horses. *Sensors* **2022**, *22*, 9533. [[CrossRef](#)]
29. Oppong, F.B.; Agbedra, S.Y. Assessing Univariate and Multivariate Normality, A Guide For Non-Statisticians. *Math. Theory Model* **2016**, *6*, 26–33.
30. Power, M.; Fell, G.; Wright, M. Principles for high-quality, high-value testing. *Evid. Based Med.* **2013**, *18*, 5–10. [[CrossRef](#)]

31. Hammarberg, M.; Egenvall, A.; Pfau, T.; Rhodin, M. Rater agreement of visual lameness assessment in horses during lungeing. *Equine Vet. J.* **2016**, *48*, 78–82. [[CrossRef](#)]
32. Pfau, T.; Bolt, D.M.; Fiske-Jackson, A.; Gerdes, C.; Hoenecke, K.; Lynch, L.; Perrier, M.; Smith, R.K.W. Linear Discriminant Analysis for Investigating Differences in Upper Body Movement Symmetry in Horses before/after Diagnostic Analgesia in Relation to Expert Judgement. *Animals* **2022**, *12*, 762. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
33. Marunova, E.; Hoenecke, K.; Fiske-Jackson, A.; Smith, R.K.W.; Bolt, D.M.; Perrier, M.; Gerdes, C.; Hernlund, E.; Rhodin, M.; Pfau, T. Changes in Head, Withers, and Pelvis Movement Asymmetry in Lamé Horses as a Function of Diagnostic Anesthesia Outcome, Surface and Direction. *J. Equine Vet. Sci.* **2022**, *118*, 104136. [[CrossRef](#)]
34. Starke, S.D.; May, S.A. Expert visual assessment strategies for equine lameness examinations in a straight line and circle: A mixed methods study using eye tracking. *Vet. Rec.* **2022**, *191*, e1684. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
35. Hardeman, A.M.; Egenvall, A.; Serra Bragança, F.M.; Koene, M.H.W.; Swagemakers, J.; Roepstorff, L.; Weeren, R.; Byström, A. Movement Asymmetries in Horses Presented for Prepurchase or Lameness Examination. *Equine Vet. J.* **2021**, *54*, 334–346. [[CrossRef](#)]
36. Pfau, T.; Noordwijk, K.; Sepulveda Caviedes, M.F.; Persson-Sjodin, E.; Barstow, A.; Forbes, B.; Rhodin, M. Head, withers and pelvic movement asymmetry and their relative timing in trot in racing Thoroughbreds in training. *Equine Vet. J.* **2018**, *50*, 117–124. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
37. Starke, S.D.; Oosterlinck, M. Reliability of equine visual lameness classification as a function of expertise, lameness severity and rater confidence. *Vet. Rec.* **2019**, *184*, 63. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
38. Keegan, K.G.; Dent, E.V.; Wilson, D.A.; Janicek, J.; Kramer, J.; Lacarrubba, A.; Walsh, D.M.; Cassells, M.W.; Esther, T.M.; Schiltz, P.; et al. Repeatability of subjective evaluation of lameness in horses: Repeatability of subjective evaluation of lameness in horses. *Equine Vet. J.* **2010**, *42*, 92–97. [[CrossRef](#)]
39. Ross, M.W.; Dyson, S.J. *Diagnosis and Management of Lameness in the Horse*, 2nd ed.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2011.
40. Greve, L.; Dyson, S. Body lean angle in sound dressage horses in-hand, on the lunge and ridden. *Vet. J.* **2016**, *217*, 52–57. [[CrossRef](#)]


Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Annexe 5 Poster présenté à l'ICEEP 2022 : Exploration of asymmetry thresholds to characterise hindlimb lameness on the circle

EXPLORATION OF ASYMMETRY THRESHOLDS TO CHARACTERISE HINDLIMB LAMENESS ON THE CIRCLE

C. Macaire^{1,2,3}, S. Hanne-Poujade¹, J.-M. Denoit¹, V. Coudry¹, S. Jacquet¹, L. Bertoni¹, A. Tallaj¹, E. De Azevedo¹, P. Martin¹, F. Marin¹, H. Chateau¹

¹ Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort, CWD-VetLab, CIRALE; ² LIM Group, CWD-VetLab; ³ Université de Technologie de Compiègne



INTRODUCTION

- Asymetry ~ lameness
- Interpretation of gait analysis systems difficult at lunge
- Essential to define the physiological and the pathological part of the asymetry on the circle


PURPOSE

To explore asymmetry thresholds that could determine the clinical relevance of a hindlimb asymmetry measured at the tuber sacrale, on the lunge on a hard surface

MATERIALS AND METHODS


- Horses were trotted at lunge on a hard surface during the locomotor examination
- Depending on the expert veterinarian evaluation independly led on both reins, multilimb lameness and grade <1 were excluded. And horses were classified into groups :

On the left rein



19 horses
LH lameness Grade ≥ 1/5

On the right rein



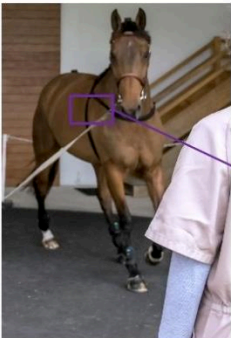
14 horses
RH lameness Grade ≥ 1/5

17 horses
LH lameness Grade ≥ 1/5

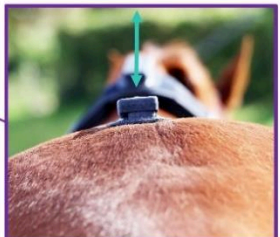
17 horses
RH lameness Grade ≥ 1/5

39 sound horses **41 sound horses**

Accelerometer on the pelvis

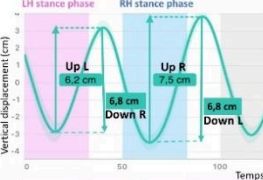


→ Vertical displacement



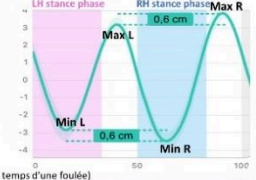
Asymmetry Index (AI)

LH stance phase RH stance phase



Up L: 6.2 cm, Down R: 6.8 cm, Up R: 7.5 cm, Down L: 6.8 cm

LH stance phase RH stance phase



Max L: 0.6 cm, Min L: 0.6 cm, Max R: 0.6 cm, Min R: 0.6 cm

AIup =
UpL - UpR
/max(Up)

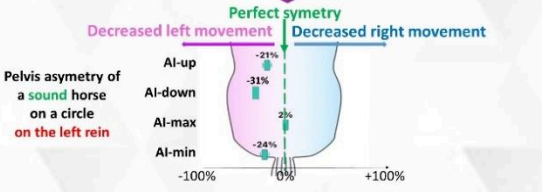
AIdown =
DownL - DownR
/max(Down)

AImax =
MaxL - MaxR
/max(Up)

AImin =
MinL - MinR
/max(Up)

Perfect symmetry

Decreased left movement Decreased right movement

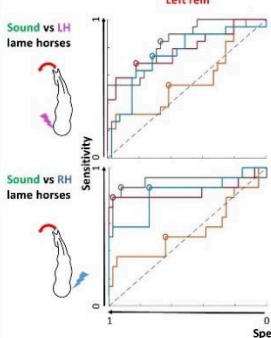


Pelvis asymmetry of a sound horse on a circle on the left rein

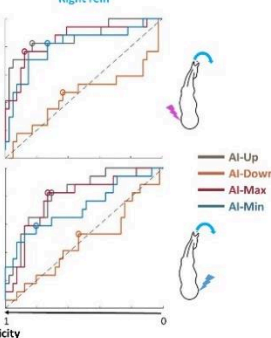
RESULTS

ROC curves plotted to discriminate sound from hindlimb lame horses

Left rein




Right rein



Sensitivity vs Specificity


- Best AI :
 - AI-Up (sensitivity > 82% & specificity > 66%)
 - AI-Max (sensitivity > 68% & specificity > 73%)
- Thresholds linked to the best sensitivity and specificity (0 Dots of ROC curves close to 1) :

Left rein




Pink : LH lame horses
Green : sound horses
Blue : RH lame horses
Yellow range : 95% Confidence interval


Right rein




AI-Up



AI-Max



AI-Min



REFERENCES

Rhodin M, Plau T, Rossipoffrill L, Egenwall A. 2013. Effect of lunging on head and pelvic movement asymmetry in horses with induced lameness. The Veterinary Journal [Internet]. [accessed 2021 Sep 11];198:e39-e45. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2013.09.011>

Plau T, Penson-Sjodin E, Gardner H, Orsato O, Hennkens E, Rhodin M. 2021. Effect of Speed and Surface Type on Individual Rein and Combined Left-Right Circle Movement Asymmetry in Horses on the Lunge. Front Vet Sci [Internet]. [accessed 2021 Sep 30]; 8:692031. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.692031>

Stankovic S, Williams E, May SA, Plau T. 2012. Vertical head and trunk movement adaptations of sound horses trotting in a circle on a hard surface. The Veterinary Journal [Internet]. [accessed 2021 Sep 11];193(1):73-80. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2011.10.019>

Plau T, Jennings C, Mitchell H, Olson E, Walker A, Sgammali A, Troster S, Waller R, Rhodin M. 2016. Lunging on hard and soft surfaces: Movement symmetry of trotting horses considered sound by their owners. Movement symmetry on hard and soft surfaces on the lunge. Equine Vet J [Internet]. [accessed 2021 Sep 11]; 48(1):83-89. <https://doi.org/10.1111/evj.12324>

Greene L, Pfla T, Dyonis S. 2017. Thoracolumbar movement in sound horses trotting in straight lines in hand and on the lunge and the relationship with hind limb symmetry or asymmetry. The Veterinary Journal [Internet]. [accessed 2021 Sep 11];220:95-104. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2017.01.003>

DISCUSSION

- Like previous studies led on straight line, AI-max and AI-up discriminate sound from lame horses at lunge.
- Thresholds classifying the measure provided by EQUISYM® into sound and hindlimb lame with the best sensitivity and specificity

LIMITATIONS OF THE STUDY

- Number of horses
- Location and type of injury not taken into account
- Potential bias : veterinarian assessment taking into account the other exercises of the complete locomotor examination.

FURTHER STUDIES

- ↑ horses number → refine thresholds
- Forelimb lameness on circles

193

DEVELOPMENT AND AUTOMATION OF A TOOL FOR MEASURING HORSE MOVEMENTS TO ASSIST IN THE PREVENTION, DIAGNOSIS AND MONITORING OF LOCOMOTOR DISORDERS

SUMMARY:

The visual examination by the veterinarian of the horse's locomotion is a decisive step in the diagnosis of locomotor disorders. Its objectification by a dedicated quantification system is a major challenge to improve the accuracy of diagnosis. However, the existing devices are not completely adapted to the conditions of veterinary practice. Thus, the objective of this thesis was to develop a measurement system that can be used in the daily practice as a tool to assist in the diagnosis of locomotor asymmetries. Today EQUISYM® is commercialised. The scientific objective of this thesis was to verify the precision of this measuring system and its capacity to discriminate lameness in any practical condition. To this end, data were recorded by EQUISYM® during locomotor examinations of horses consulting at the CIRALE, a veterinary clinic specialized in equine locomotor disorders. In order to assess the system's repeatability, the variation in asymmetry measurements was measured. The proportion of variation due to the operator and the intra-individual proportion were identified. In addition, mean asymmetry and inter-individual variation were measured in a sample of sound horses. Asymmetry indices showing high sensitivity and specificity for lameness discrimination visually assessed by a specialist veterinarian were selected. At trot in-hand on a hard surface in a straight line and in circles, for these relevant indices, the asymmetry thresholds used to detect lameness and to identify the affected limb were determined. These thresholds are necessary for the clinical interpretation of EQUISYM® results in order to identify physiological asymmetry from lameness. This work has validated the accuracy of an asymmetry quantification tool, and provided guidelines for clinical interpretation by veterinarians.

KEYWORDS: Horse ; Asymmetry ; Lameness ; Biomechanics ; Veterinary medicine ; Connected device ; Locomotion

DEVELOPPEMENT ET AUTOMATISATION D'UN OUTIL DE MESURE DES MOUVEMENTS DU CHEVAL POUR L'AIDE A LA PREVENTION, AU DIAGNOSTIC ET AU SUIVI VETERINAIRE DES AFFECTIONS LOCOMOTRICES

RÉSUMÉ :

L'examen visuel de la locomotion du cheval par le vétérinaire est une étape déterminante du diagnostic des affections locomotrices. Son objectivation par des systèmes de quantification d'asymétrie est un enjeu majeur pour améliorer la précision des diagnostics. Cependant peu de dispositifs de mesure cinématique sont adaptés à la pratique vétérinaire sur le terrain. Ainsi l'objectif de cette thèse était de développer un système de quantification d'asymétries locomotrices fiable et utilisable par les vétérinaires comme un outil d'aide au diagnostic. Ce travail de thèse a pour objectif scientifique de vérifier la précision du système de mesure EQUISYM® développé lors de cette thèse et d'analyser sa capacité de discrimination des boiteries sur les différentes conditions d'un examen locomoteur. Dans ce but, les données ont été enregistrées avec EQUISYM® au cours d'examens locomoteurs de chevaux venus en consultation au CIRALE, clinique vétérinaire spécialisée en affections locomotrices équines. Afin de vérifier la répétabilité du système, la variation liée à la répétition de mesures d'asymétrie a été mesurée. La part de variation due à l'opérateur et la part intra-individuelle ont été identifiées. De plus, l'asymétrie moyenne et la variation inter-individus a été mesurée dans un échantillon de chevaux sains. Pour le trot sur sol dur en ligne droite et en cercle, les indices d'asymétrie montrant une haute sensibilité et spécificité pour discriminer les boiteries évaluées par un vétérinaire spécialiste ont été sélectionnés. Pour ces indices pertinents, les seuils d'asymétrie associés à cette capacité de détection des boiteries et d'identification du membre affecté ont été déterminés. Ces seuils apportent une aide à l'interprétation clinique des valeurs chiffrées issues d'EQUISYM®. Ce travail a validé la précision d'un outil de quantification d'asymétrie et a fourni des conseils d'utilisation pour l'interprétation clinique par les vétérinaires, notamment pour différencier une asymétrie physiologique d'une boiterie.

MOTS CLÉS : Cheval ; Asymétrie ; Boiterie ; Biomécanique ; Médecine vétérinaire ; Objet connecté ; Locomotion