



HAL
open science

Évaluation de l'influence des pressions irrégulières de la selle sur la locomotion du cheval de sport

Jonathan Urlacher

► **To cite this version:**

Jonathan Urlacher. Évaluation de l'influence des pressions irrégulières de la selle sur la locomotion du cheval de sport. Sciences du Vivant [q-bio]. 2022. dumas-03722123

HAL Id: dumas-03722123

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03722123v1>

Submitted on 13 Jan 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.

**VETAGRO SUP
CAMPUS VÉTÉRINAIRE DE LYON**

Année 2022 – Thèse n° 012

***ÉVALUATION DE L'INFLUENCE DES
PRESSIONS IRRÉGULIÈRES DE LA SELLE SUR
LA LOCOMOTION DU CHEVAL DE SPORT***

THÈSE

Présentée à l'Université Claude Bernard Lyon 1
(Médecine – Pharmacie)
et soutenue publiquement le 24/06/2022
pour obtenir le grade de Docteur Vétérinaire

Par

URLACHER Jonathan

**VETAGRO SUP
CAMPUS VÉTÉRINAIRE DE LYON**

Année 2022 – Thèse n° 012

***ÉVALUATION DE L'INFLUENCE DES
PRESSIONS IRRÉGULIÈRES DE LA SELLE SUR
LA LOCOMOTION DU CHEVAL DE SPORT***

THÈSE

Présentée à l'Université Claude Bernard Lyon 1
(Médecine – Pharmacie)
et soutenue publiquement le 24/06/2022
pour obtenir le grade de Docteur Vétérinaire

Par

URLACHER Jonathan

Liste des enseignants du Campus vétérinaire de Lyon (26-01-2022)

Mme	ABITBOL	Marie	Professeur
M.	ALVES-DE-OLIVEIRA	Laurent	Maître de conférences
Mme	ARCANGIOLI	Marie-Anne	Professeur
Mme	AYRAL	Florence	Maître de conférences
Mme	BECKER	Claire	Maître de conférences
Mme	BELLUCO	Sara	Maître de conférences
Mme	BENAMOU-SMITH	Agnès	Maître de conférences
M.	BENOIT	Etienne	Professeur
M.	BERNY	Philippe	Professeur
Mme	BONNET-GARIN	Jeanne-Marie	Professeur
M.	BOURGOIN	Gilles	Maître de conférences
M.	BRUTO	Maxime	Maître de conférences Stagiaire
M.	BRUYERE	Pierre	Maître de conférences
M.	BUFF	Samuel	Professeur
M.	BURONFOSSE	Thierry	Professeur
M.	CACHON	Thibaut	Maître de conférences
M.	CADORÉ	Jean-Luc	Professeur
Mme	CALLAIT-CARDINAL	Marie-Pierre	Professeur
M.	CHABANNE	Luc	Professeur
Mme	CHALVET-MONFRAY	Karine	Professeur
M.	CHAMEL	Gabriel	Maître de conférences
M.	CHETOT	Thomas	Maître de conférences Stagiaire
Mme	DE BOYER DES ROCHES	Alice	Maître de conférences
Mme	DELIGNETTE-MULLER	Marie-Laure	Professeur
Mme	DJELOUADJI	Zorée	Professeur
Mme	ESCRIOU	Catherine	Maître de conférences
M.	FRIKHA	Mohamed-Ridha	Maître de conférences
M.	GALIA	Wessam	Maître de conférences
M.	GILLET	Benoit	AERC
Mme	GILLOT-FROMONT	Emmanuelle	Professeur
M.	GONTHIER	Alain	Maître de conférences
Mme	GREZEL	Delphine	Maître de conférences
Mme	HUGONNARD	Marine	Maître de conférences
Mme	JOSSON-SCHRAMME	Anne	Chargé d'enseignement contractuel
M.	JUNOT	Stéphane	Professeur
M.	KODJO	Angeli	Professeur
Mme	KRAFFT	Emilie	Maître de conférences
Mme	LAABERKI	Maria-Halima	Maître de conférences
Mme	LAMBERT	Véronique	Maître de conférences
Mme	LE GRAND	Dominique	Professeur
Mme	LEBLOND	Agnès	Professeur
Mme	LEDOUX	Dorothee	Maître de conférences
M.	LEFEBVRE	Sébastien	Maître de conférences
Mme	LEFRANC-POHL	Anne-Cécile	Maître de conférences
M.	LEGROS	Vincent	Maître de conférences
M.	LEPAGE	Olivier	Professeur
Mme	LOUZIER	Vanessa	Professeur
M.	LURIER	Thibaut	Maître de conférences Stagiaire
M.	MAGNIN	Mathieu	Maître de conférences Stagiaire
M.	MARCHAL	Thierry	Professeur
Mme	MOSCA	Marion	Maître de conférences
M.	MOUNIER	Luc	Professeur
Mme	PEROZ	Carole	Maître de conférences
M.	PIN	Didier	Professeur
Mme	PONCE	Frédérique	Professeur
Mme	PORTIER	Karine	Professeur
Mme	POUZOT-NEVORET	Céline	Maître de conférences
Mme	PROUILLAC	Caroline	Professeur
Mme	REMY	Denise	Professeur
Mme	RENE MARTELLET	Magalie	Maître de conférences
M.	ROGER	Thierry	Professeur
M.	SAWAYA	Serge	Maître de conférences
M.	SCHRAMME	Michael	Professeur
Mme	SERGENTET	Delphine	Professeur
M.	TORTEREAU	Antonin	Maître de conférences
Mme	VICTONI	Tatiana	Maître de conférences
M.	VIGUIER	Eric	Professeur
Mme	VIRIEUX-WATRELOT	Dorothee	Chargé d'enseignement contractuel
M.	ZENNER	Lionel	Professeur

Remerciements

A Madame le Professeur Elvire SERVIEN,
De la faculté de médecine de Lyon, pour avoir accepté et nous avoir fait l'honneur de
présider ce jury.
Mes hommages respectueux.

A Madame Monika GANGL,
Du campus vétérinaire de Lyon VetAgro Sup, pour m'avoir encadré avec enthousiasme et
pédagogie tout au long de ce travail, pour votre réactivité et vos remarques pertinentes,
Veuillez trouver ici l'expression de toute ma gratitude, merci pour tout.

A Monsieur le Professeur Michael SCHRAMME,
Du campus vétérinaire de Lyon VetAgro Sup, pour avoir accepté de prendre part au jury de
ce travail de thèse,
Mes remerciements les plus sincères.

A Madame le Professeur Vanessa LOUZIER,
Du campus vétérinaire de Lyon VetAgro Sup, pour avoir accepté et m'avoir fait l'honneur
de participer à ce jury et pour l'intérêt porté à ce travail,
Mes sincères remerciements.

A Monsieur Bruno BAUP,
De la Clinique du Cheval, pour m'avoir donné l'amour de ce métier
et confié la réalisation de ce travail,
Qu'il trouve ici l'expression de mon profond respect et de ma reconnaissance.

Table des matières

TABLE DES ANNEXES.....	- 13 -
TABLE DES FIGURES.....	- 15 -
GLOSSAIRE.....	- 19 -
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	- 19 -
INTRODUCTION.....	- 23 -
PARTIE I :	- 25 -
ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	- 25 -
I) RAPPELS ANATOMIQUES ET DE BIOMECHANIQUE DU DOS DU CHEVAL - 27 -	
A) ANATOMIE DU DOS DU CHEVAL	- 27 -
1) La colonne vertébrale : charnière du mouvement.....	- 27 -
a) Constitution	- 27 -
b) Courbures naturelles de la colonne.....	- 27 -
c) Articulations de la colonne	- 28 -
2) Myologie de la colonne vertébrale	- 30 -
a) La musculature juxtavertébrale en rapport avec la selle.....	- 30 -
b) La musculature paravertébrale en rapport avec la selle.....	- 31 -
i) Les muscles fléchisseurs.....	- 31 -
ii) Les muscles extenseurs.....	- 32 -
α) Extenseurs de la colonne thoraco-lombaire.....	- 32 -
β) Extenseurs de l'encolure.....	- 33 -
c) Les fascias en rapport avec la selle.....	- 35 -
3) Angiologie et neurologie de la colonne vertébrale.....	- 36 -
a) Vascularisation cutanée	- 36 -
b) Vascularisation musculaire.....	- 36 -
c) Structures nerveuses	- 36 -
B) BIOMECHANIQUE DU DOS DU CHEVAL.....	- 37 -
1) Les modèles et techniques utilisés.....	- 37 -
2) Nature des mouvements possibles.....	- 39 -
a) Mouvements des vertèbres	- 39 -
b) Mouvements des charnières thoraco-lombaires.....	- 40 -
i) Études ex vivo	- 40 -
ii) Études cinématiques in vivo	- 42 -
3) Effet et importance de l'encolure dans la biomécanique du cheval	- 43 -
C) EFFET DU CAVALIER ET DE LA SELLE SUR LA BIOMECHANIQUE DU DOS DU CHEVAL....	- 44 -
1) Effet du poids du cavalier.....	- 44 -
2) Effet de l'expérience du cavalier	- 45 -
3) Effet de la technique de trot utilisée	- 46 -

II) ADAPTATION DE LA SELLE AU DOS DU CHEVAL : LE SADDLE FITTING, ETAT DES LIEUX ET PERSPECTIVES ACTUELLES - 47 -

A) STRUCTURE DE LA SELLE	- 47 -
1) Les différents types de selle.....	- 47 -
2) Les constituants de la selle	- 47 -
a) L'arçon.....	- 47 -
b) Les couteaux	- 48 -
c) Les quartiers	- 50 -
d) Les taquets	- 51 -
e) Les panneaux	- 51 -
f) Les contres sanglons	- 51 -
g) La sangle.....	- 51 -
3) Les missions de la selle	- 52 -
B) IMPORTANCE DU SADDLE FITTING DANS LA MEDECINE VETERINAIRE ACTUELLE	- 52 -
1) Historique et définition.....	- 52 -
2) Selle mal adaptée : quelles conséquences ?.....	- 53 -
a) La pression comme principale ennemie du sellier.....	- 53 -
b) Première conséquence d'une pression excessive : la douleur	- 54 -
c) Baisse de performance et gêne locomotrice	- 54 -
d) Signes physiques.....	- 55 -
i) Poils cassés	- 55 -
ii) Perturbation de la sudation.....	- 55 -
iii) Gonflement des tissus mous.....	- 56 -
iv) Blanchissement des poils	- 56 -
3) Évaluation de l'adaptation de la selle au dos du cheval	- 57 -
a) Points clés à observer	- 57 -
i) Examen de la selle isolée.....	- 57 -
ii) Examen statique de la selle sur le dos du cheval	- 57 -
iii) Examen dynamique de la selle sur le dos du cheval	- 58 -
b) Les outils à disposition du vétérinaire pour juger de la bonne adaptation de la selle	- 59 -
4) Les selles modernes : une adaptabilité de plus en plus importante	- 62 -

PARTIE II :..... - 65 -

ÉTUDE EXPERIMENTALE : EVALUATION DE L'EFFET D'UN DESEQUILIBRE EXAGERE DE LA SELLE SUR LA LOCOMOTION DU CHEVAL - 65 -

I) OBJECTIF DE L'ETUDE - 67 -

II) MATERIEL ET METHODE..... - 67 -

A) POPULATION D'ETUDE	- 67 -
1) Critères d'inclusion.....	- 67 -
2) Critères de non-inclusion.....	- 68 -
3) Écuries, infrastructures à disposition, et cavalier de l'étude	- 68 -
a) Première expérimentation.....	- 68 -
b) Deuxième expérimentation.....	- 69 -
B) MATERIEL.....	- 69 -

1) Tapis utilisé pour les études.....	- 69 -
2) Analyse de la locomotion au moyen du système Lameness Locator Equinosis..	- 72 -
a) Fonctionnement du système et utilisation	- 72 -
i) Principes généraux.....	- 72 -
ii) Les capteurs	- 73 -
a) Méthode d'analyse.....	- 74 -
i) Analyse du mouvement de la tête du cheval et paramètres utilisés.....	- 74 -
ii) Analyse du mouvement du bassin du cheval et paramètres étudiés	- 77 -
3) Analyse de la locomotion au moyen du système MS100 de Movin'Smart.....	- 80 -
a) Fonctionnement du système et utilisation	- 80 -
i) Principes généraux.....	- 80 -
ii) Les capteurs	- 80 -
b) Méthode d'analyse.....	- 82 -
i) Tracé d'un graphique.....	- 82 -
ii) Étude du mouvement à l'aide du capteur MS100.....	- 84 -
α) Étude de la fréquence du mouvement.....	- 85 -
β) Étude de l'amplitude du mouvement.....	- 86 -
γ) Étude de la symétrie à l'aide du programme de la société Movin'Smart	- 88 -
C) PROTOCOLES EXPERIMENTAUX.....	- 90 -
1) Première expérimentation : le déséquilibre de la selle	- 90 -
2) Deuxième expérimentation : la pression exagérée de la selle	- 93 -
D) ANALYSE STATISTIQUE.....	- 95 -
III) RESULTATS	- 96 -
IV) DISCUSSION	- 98 -
BIBLIOGRAPHIE	- 103 -
ANNEXES	- 107 -

Table des annexes

Annexe 1 : Agrément du comité d'éthique de VetAgro Sup pour la réalisation de ce travail de thèse.....	- 107 -
Annexe 2 : Résultats pour chaque paramètre étudié au cours de la première expérimentation.....	- 108 -
Annexe 3 : Résultats pour chaque paramètre étudié au cours de la deuxième expérimentation.....	- 113 -
Annexe 4 : Résultats de l'analyse statistique pour l'expérimentation n°1. Les valeurs significatives (p-value < 0,05) sont colorées en vert.....	- 115 -
Annexe 4 : Résultats de l'analyse statistique pour l'expérimentation n°2. Les valeurs significatives (p-value < 0,05) sont colorées en vert.....	- 116 -

Table des figures

Figure 1 : Les inflexions naturelles de la colonne vertébrale du cheval (d'après Denoix) .	- 28 -
Figure 2 : Articulation intervertébrale thoracique (d'après Denoix)	- 29 -
Figure 3 : Muscles juxtavertébraux de l'encolure et du tronc.	- 31 -
Figure 4 : Muscles de l'encolure et du tronc, plan profond.....	- 33 -
Figure 5 : Muscles de l'encolure et du tronc, plan superficiel (à gauche) et plan moyen (à droite).	- 34 -
Figure 6 : Muscles de l'encolure et du tronc, plan superficiel.....	- 35 -
Figure 7 : Modèle du « pont » thoracique chez un cheval debout. Les flèches bleues représentent les forces s'appliquant sur le pont thoracique. (d'après Van Weeren et al, 2010)	- 38 -
Figure 8 : Vue latéro-crâniale gauche de la 17ème vertèbre thoracique, à laquelle un repère orthogonal droit (x, y, z) est appliqué. (Townsend, Leach and Fretz, 1983).....	- 39 -
Figure 9 : Protocole et résultats expérimentaux de Townsend et coll., 1983.	- 41 -
Figure 10 : Illustration du protocole expérimental utilisé par Denoix en 1987, utilisant des pièces anatomiques et des tendeurs.	- 44 -
Figure 11 : Arçons de selle anglaise (vue de ¾ face et vue du dessus) (d'après Cottureau)-	48 -
Figure 12 : Les principaux constituants de la selle.....	- 49 -
Figure 13 : Couteau d'étrivière réglable. (d'après Cottureau).....	- 49 -
Figure 14 : Exemples de selles sans quartiers. La Podium Extra Light (à gauche) pour l'endurance, et la Butet Practice (à droite) pour le saut d'obstacle. (Source : Butet)..	- 50 -
Figure 15 : Nombre de publications répondant à la recherche « horse saddle » enregistrées dans Pub Med par année, entre 1946 et avril 2022.	- 53 -
Figure 16 : Cheval présentant une zone sèche après un travail intense (d'après Von Peinen et al., 2010)	- 56 -
Figure 17 : Utilisation d'une courbe flexible par un sellier. (Source : Saddle Fitting)	- 59 -
Figure 18 : Equiscan® positionné sur le dos d'un cheval. (Source : Equiscan).....	- 60 -
Figure 19 : Image issue de l'utilisation d'un tapis capteur de pression chez un cheval monté. Les zones bleues représentent les pressions faibles, tandis que les zones rouges représentent les pressions élevées. (Bonati, 2011)	- 60 -
Figure 20 : Motif thermique d'une selle observée directement après l'effort. Ici, la chaleur n'est pas répartie de façon homogène sur les panneaux et les quartiers, ce qui signe une selle mal adaptée au dos du cheval en question. (Veterinary Thermal Imaging)	- 61 -
Figure 21 : Exemple d'une selle ajustable de la marque Evolutionary Saddles. Les matelassures s'adaptent selon la morphologie du dos auquel elles doivent répondre.(Source : Evolutionary Saddle)	- 62 -
Figure 22 : Pad de garrot, utilisé pour surélever une selle comprimant le garrot. (Photo J. Urlacher).....	- 63 -

Figure 23 : Amortisseur « interface », de la sellerie Maurel. Cet amortisseur est coupé de façon à dégager les épaules et s'adaptera donc bien aux chevaux possédant une épaule forte. Il est possible de glisser des cales (flèches bleues) et de positionner ou non une cale en feutre (flèche rouge) à l'arrière de la selle pour corriger l'équilibre et améliorer l'adaptation de la selle. (Source : Maurel).....	- 63 -
Figure 24 : Amortisseur à mémoire de forme, permettant de limiter les points de pression localisés et de corriger les défauts de la selle. (Photo J. Urlacher).....	- 64 -
Figure 25 : Tapis utilisé pour les mesures (Photo B. Baup).....	- 70 -
Figure 26 : Cheval sellé avec le tapis de l'étude, et aucune cale en feutre. (Photo J. Urlacher).	- 71 -
Figure 27 : Cheval sellé avec le tapis de l'étude, et les deux cales avant en feutre. (Photo J. Urlacher).....	- 71 -
Figure 28 : Cheval sellé avec le tapis de l'étude, et les deux cales arrière en feutre. (Photo J. Urlacher).....	- 72 -
Figure 29 : Gyroscope dans son étui, placé sur la face dorsale du paturon du membre antérieur droit. (Photo J. Urlacher)	- 73 -
Figure 30 : Accéléromètres positionnés dans leurs étuis, sur la tête du cheval (à gauche) et sur le pelvis du cheval (à droite). (Photos J. Urlacher)	- 74 -
Figure 31 : Mouvement de la tête du cheval sain lors de déplacement au trot (d'après les manuels officiels de préparation aux brevets fédéraux)	- 74 -
Figure 32 : Exemple du mouvement vertical de la tête chez un cheval boitant de l'antérieur gauche (d'après Rhodin et al., 2018).....	- 75 -
Figure 33 : Exemple du mouvement vertical de la tête chez un cheval boitant de l'antérieur droit (d'après (Rhodin et al., 2018).....	- 75 -
Figure 34 : Rapport d'examen fournit par la tablette Lameness Locator après chaque séance. (Photo J. Urlacher).....	- 77 -
Figure 35 : Mouvement vertical du sacrum et des deux tuber coxae chez un cheval sain au trot. On observe que le déplacement du sacrum est identique à chaque foulée, et que le tuber coxae monte légèrement plus haut que le tuber coxae controlatéral lors de la phase d'appui du membre ipsilatéral.	- 78 -
Figure 36 : Mouvement vertical du sacrum et des deux tuber coxae chez un cheval boitant du postérieur droit au trot. On observe que le déplacement du sacrum n'est plus identique à chaque foulée, et qu'il est légèrement moins haut lors de la phase d'appui du membre sain (postérieur gauche). On remarque également que le tuber coxae droit (membre douloureux) descend plus bas que le tuber coxae gauche.	- 79 -
Figure 37 : Capteur MS100 du cheval (à gauche) et du cavalier (à droite) positionnés lors de l'examen. (Photos J. Urlacher)	- 81 -
Figure 38 : Données issues d'une phase de trot du cheval Kiss Me Devil Z équipé des capteurs Movin'Smart.(d'après Movin'Smart).....	- 82 -

Figure 39 : Graphique représentant l'accélération verticale de la tête du cheval en fonction du temps, au cours d'une mesure en ligne droite. (Source : Logiciel Matlab).....	- 83 -
Figure 40 : Tableau des plages de données sélectionnées pour chaque cheval.	- 84 -
Figure 41 : Diagramme de la densité spectral de puissance d'une phase de trot de Flora. Le pic à 0 Hz représente la composante continue du signal, le signal initial n'étant pas centré sur zéro.	- 86 -
Figure 42 : Repérage des extremums du mouvement vertical de la tête d'un cheval boitant de l'antérieur gauche sous Matlab. Chaque cercle rouge repère un extremum haut, et chaque cercle vert représente un extremum bas. Cela permet de calculer les amplitudes de chaque mouvement de tête. Ces amplitudes sont ensuite stockées dans un tableur Excell.	- 87 -
Figure 43 : Identification des zones de trot sur un cheval ne repassant pas au pas (Source : Movin'Smart).	- 88 -
Figure 44 : Identifications des zones de trot chez un cheval repassant une fois au pas (Source : Movin'Smart).	- 88 -
Figure 45 : : Identifications des zones de trot chez un cheval repassant deux fois au pas (Source : Movin'Smart).	- 89 -
Figure 46 : Graphiques représentant la symétrie temporelle des foulées ainsi que la variabilité associée (Source : Movin'Smart).	- 89 -
Figure 47 : Graphiques représentant la symétrie latérale des foulées ainsi que la variabilité associée (Source : Movin'Smart).	- 90 -
Figure 48 : Exemple de disposition des cales sur le tapis de l'étude pour l'expérimentation n°1 (vue de dessus). (Photo J. Urlacher).....	- 91 -
Figure 49 : Exemple de disposition des cales sur le tapis de l'étude pour l'expérimentation n°1 (vue de profil). (Photo J. Urlacher).....	- 91 -
Figure 50 : Schéma récapitulatif du déroulement d'une mesure suivant le protocole décrit précédemment. (Photo J. Urlacher).....	- 93 -
Figure 51 : Exemple de disposition des cales sur le tapis de l'étude pour l'expérimentation n°2 (vue de dessus). (Photo J. Urlacher).....	- 94 -
Figure 52 : Exemple de disposition des cales sur le tapis de l'étude pour l'expérimentation n°2 (vue de profil). (Photo J. Urlacher).....	- 94 -
Figure 53 : Fréquence prédominante du mouvement vertical de la tête du cheval en fonction des cales mises en place sur le tapis. Lignes droites uniquement.....	- 96 -
Figure 54 : Amplitude moyenne et écarts types associés du mouvement vertical de la tête du cheval en fonction des cales mises en place sur le tapis. Lignes droites uniquement.	- 97 -

Glossaire

Assiette du cavalier : En équitation, l'*assiette* est une des aides par laquelle le cavalier gère sa stabilité, notamment par la recherche d'une bonne assise au niveau de la selle.

Bombe : Casque porté par le cavalier pour sa propre sécurité.

Bipède diagonal (droit ou gauche) : Membres du cheval comprenant l'antérieur gauche et le postérieur droit (bipède *diagonal* gauche) ou l'antérieur droit et le postérieur gauche (bipède *diagonal* droit).

En main : Un cheval est « en main » lorsqu'il est tenu par un individu au sol.

Galop : La plus rapide des allures naturelles du cheval et d'autres équidés. C'est une allure dissymétrique, sautée à trois temps.

Incurvation : Action d'incurver ; fait d'être incurvé. En équitation, un cheval s'incurve lorsque son rachis se plie pour suivre la courbe tracée, avec souplesse.

Main (gauche ou droite) : On parle de changement de main lorsque le cavalier change son sens de rotation dans le manège. Un cavalier marche piste à « main droite » lorsque sa main droite se trouve du côté intérieur du manège et inversement pour la « main gauche ».

Pansage : Action de panser un animal domestique. Le pansage s'effectue avant et après une séance d'équitation, et permet de nettoyer le cheval tout en le massant.

Pas : La plus lente des allures naturelles du cheval, dans laquelle chaque membre se lève et se pose successivement dans l'ordre : postérieur droit, antérieur gauche, postérieur gauche, antérieur droit. C'est une allure marché à quatre temps.

Phase d'appui : Dans le déroulement de la foulée du cheval, il s'agit de la phase entre le début du contact au sol (poser du pied) jusqu'à la fin de la bascule (propulsion), où le pied quitte le sol.

Phase de soutien : Dans le déroulement de la foulée du cheval, il s'agit de la phase entre le moment où le pied quitte le sol (propulsion) jusqu'au poser du pied au sol.

Pommeau : Partie antérieure, légèrement bombée, de l'arçon d'une selle de cheval.

Sanglage : Action de sangler. La sangle passe sous l'abdomen du cheval, et en étant liée à la selle, permet à cette dernière de tenir en place lors du mouvement.

Trot : Allure du cheval, et de certains autres quadrupèdes, intermédiaire entre le pas et le galop et caractérisée par des battues également espacées, exécutées successivement par chaque bipède diagonal. C'est une allure sautée à deux temps.

Troussequin : Partie postérieure d'une selle, plus relevée que les autres parties.

Liste des abréviations

Toutes les abréviations utilisées correspondent aux paramètres fournis par les capteurs de locomotion, et utilisés pour caractériser le mouvement.

Diff max head : donnée fournie par le capteur Lameness Locator, correspondant à la différence entre la hauteur maximale de la tête lors du poser du membre antérieur droit et la hauteur maximale de la tête lors du poser du membre antérieur gauche.

Diff min head : donnée fournie par le capteur Lameness Locator, correspondant à la différence entre la hauteur minimale de la tête lors de la première partie de la phase d'appui de l'antérieur droit et la hauteur minimale de la tête lors de la première partie de la phase d'appui de l'antérieur gauche.

Diff max pelvis : donnée fournie par le capteur Lameness Locator, correspondant à la différence entre la hauteur maximale du pelvis lors du poser du membre antérieur droit et la hauteur maximale du pelvis lors du poser du membre antérieur gauche

Diff min pelvis : donnée fournie par le capteur Lameness Locator, correspondant à la différence entre la hauteur minimale du pelvis lors de la première partie de la phase d'appui de l'antérieur droit et la hauteur minimale du pelvis lors de la première partie de la phase d'appui de l'antérieur gauche.

Fréquence prédominante : donnée fournie par le capteur Movin'Smart, correspondant à la fréquence du mouvement de la tête la plus retrouvée lors de la mesure, à l'aide de la densité spectrale de puissance.

Amplitude moy : donnée fournie par le capteur Movin'Smart, correspondant à la moyenne de l'amplitude verticale du mouvement de la tête au cours de la mesure.

Amplitude SD : donnée fournie par le capteur Movin'Smart, correspondant à l'écart type de l'amplitude verticale du mouvement de la tête au cours de la mesure.

Sym Ff : donnée fournie par le capteur Movin'Smart, correspondant à la symétrie entre les fréquences des foulées droites et gauches.

Var Ff : donnée fournie par le capteur Movin'Smart, correspondant à la variabilité de la fréquence des foulées.

Sym amp : donnée fournie par le capteur Movin'Smart, correspondant à la symétrie entre les amplitudes des foulées droites et gauches.

Var amp : donnée fournie par le capteur Movin'Smart, correspondant à la variabilité de l'amplitude des foulées.

Introduction

Le cheval est devenu, au fur et à mesure des années, un athlète sélectionné, entraîné, et monté en quête de performance. Et quel que soit le niveau auquel évolue le couple cheval-cavalier, l'utilisation d'une selle est nécessaire afin d'améliorer le confort et la stabilité du cavalier lors de l'exercice. La selle doit alors mettre en relation deux structures biologiques en mouvement, et permettre l'échange d'informations de façon bidirectionnelle entre le dos du cheval et l'assiette du cavalier. Et si la selle doit assurer cette fonction de transmission d'informations, elle doit également répondre à la fois à des critères de bien-être animal et à des critères de performance.

Des critères de bien-être animal car ce sont des considérations qui sont aujourd'hui au cœur des sports dans lesquels les chevaux évoluent, et qu'une selle qui blesse un cheval au travail, ou qui le gêne dans sa locomotion en entraînant des douleurs ne respecte pas le bien-être des chevaux.

Des critères de performance également puisque pour être performant, le cheval doit pouvoir se déplacer librement, sans être gêné par son équipement, et sans être sujet à des douleurs lors de l'exercice. Par ailleurs, le matériel utilisé influencera directement les performances du cheval et cherchera donc à être le plus techniquement intéressant possible (poids par exemple).

La première partie de ce travail s'intéresse aux structures intrinsèques du dos du cheval, à sa biomécanique, et à ses interactions avec la selle lors de l'exercice. Les relations entre la selle et le dos du cheval sont complexes, puisque la structure presque rigide de la selle doit pouvoir s'adapter à la structure souple et mobile du rachis du cheval, tout en offrant un siège confortable au cavalier. Pour mieux comprendre ces relations, l'anatomie du dos du cheval est décortiquée, ainsi que les différents constituants de la selle. La biomécanique du dos du cheval « nu » et « sellé » est également étudiée afin de déterminer les points clés de l'adaptation de la selle au dos du cheval. Enfin, les critères de l'adaptation de la selle, et les outils à disposition du sellier pour le mettre en œuvre sont passés en revue.

La seconde partie de ce travail est expérimentale, et propose d'étudier l'influence d'un déséquilibre de la selle, et l'influence d'une pression localement augmentée de la selle, sur la locomotion du cheval de sport. Pour cela, un tapis disposant de cales amovibles en feutre a été utilisé, ainsi que deux capteurs de locomotion disponibles dans le commerce. L'objectif de l'étude étant d'observer si les modifications induites par le tapis modifiaient de manière significative la locomotion du cheval monté, et le cas échéant, de caractériser les modifications observées en rapport avec la façon dont la selle est inadaptée.

Si des résultats sont obtenus à l'issue de ce travail expérimental, ils pourraient nous aider à améliorer la conception des selles actuelles, et à déterminer la façon dont doit être corrigée une selle en fonction des défauts de locomotion observés chez le cheval à l'exercice avec cette dernière.

Partie I :

Étude bibliographique

I) Rappels anatomiques et de biomécanique du dos du cheval

A) Anatomie du dos du cheval

Le dos du cheval est l'interface entre l'animal et le cavalier qui le monte. À travers cette interface, la selle, et son assiette, le cavalier transmet des informations à sa monture. Il est également établi que les émotions, tensions, et humeurs seraient transmises à travers cette interface, de façon bidirectionnelle. Le dos est donc un élément clé de la relation cavalier-cheval, et la connaissance de son anatomie fonctionnelle est nécessaire pour comprendre l'impact que peut avoir une selle sur le dos du cheval.

1) La colonne vertébrale : charnière du mouvement

a) Constitution

Chez le cheval, la colonne vertébrale est composée de 7 vertèbres cervicales, 18 vertèbres thoraciques, 6 vertèbres lombaires, 5 vertèbres sacrales, et 18 à 22 vertèbres caudales.

Les vertèbres cervicales sont les plus mobiles : leur tête hémisphérique, associée à leur fosse vertébrale profonde, permettent des mouvements amples des unes par rapport aux autres.

Les vertèbres thoraciques présentent une mobilité moins importante, mais ont des processus épineux imposants (pouvant dépasser 30cm de longueur dans la région du garrot), qui ont un rôle de bras de levier important et efficace. L'orientation de ces processus épineux s'inverse entre la 13^e et la 16^e vertèbre thoracique, devenant dorso-crâniale en région lombaire.

Les vertèbres lombaires possèdent, elles, des processus transverses très longs. Leur mobilité est réduite, particulièrement en latéroflexion (incurvation).

Enfin, le sacrum est formé de 5 vertèbres sacrales soudées. De puissants ligaments sacro-iliaques le rattachent aux iliums droits et gauche. (Denoix and Pailloux, 1997)

Le poids du cavalier repose sur les vertèbres thoraciques, entre la 10^{ème} et la 15^{ème} vertèbre thoracique. C'est la principale zone de dorsalgies lors d'une selle non adaptée au dos du cheval.

b) Courbures naturelles de la colonne

La colonne vertébrale présente une série de courbures (figure 1), plus ou moins prononcées selon les individus.

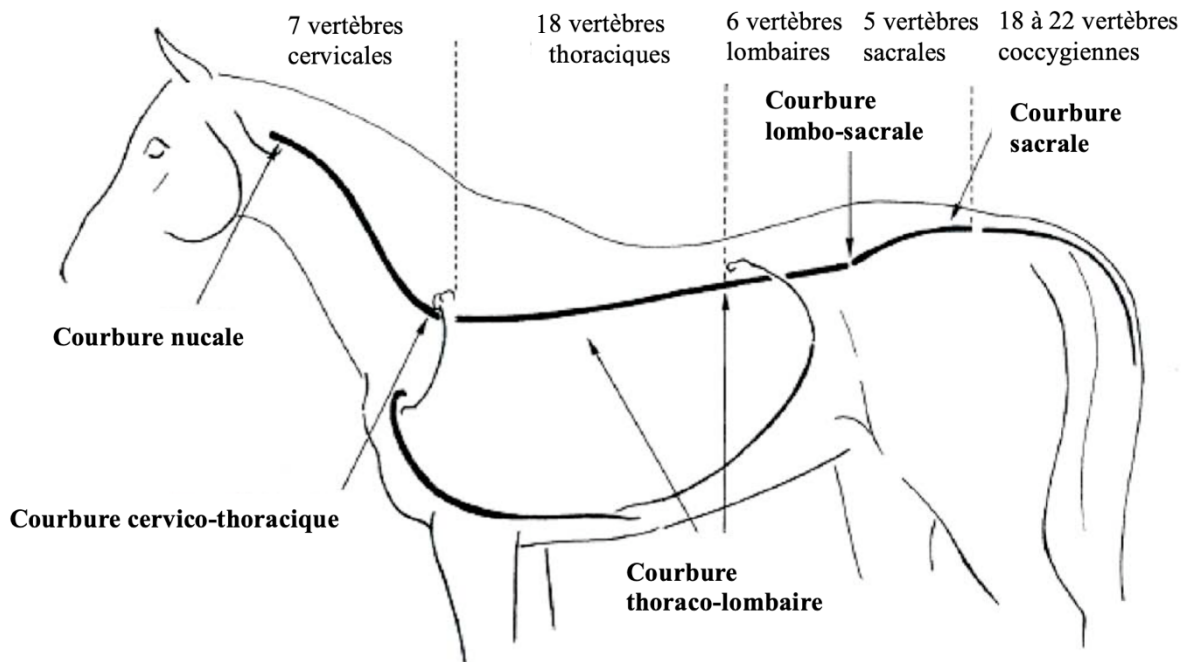


Figure 1 : Les inflexions naturelles de la colonne vertébrale du cheval (d'après Denoix)

De l'os occipital à C3, la première courbure est à convexité dorsale. On la nomme courbure nuchale, ou cervicale haute. Vient ensuite la courbure cervico-thoracique, ou cervicale basse, à convexité ventrale et s'étendant de C4 à T4. Le pont thoraco-lombaire qui suit, jusqu'à S1, est quasiment rectiligne. La courbure lombo-sacrale est très marquée, et à la particularité d'être limitée au seul espace intervertébral lombo-sacral. L'angle entre l'axe du sacrum et de la région lombaire est d'environ 15 à 25°. Enfin, la dernière courbure de la colonne vertébrale du cheval est la courbure sacrale, à convexité dorsale.

Ces courbures conditionnent en grande partie les mouvements de la charnière vertébrale, et joueront un rôle important dans la biomécanique du dos du cheval.

c) Articulations de la colonne

La colonne vertébrale est donc une structure segmentaire, constituée d'une cinquantaine de vertèbres, distinctes mais étroitement liées les unes aux autres, à travers les articulations intervertébrales et épiaxiales (synoviales). Ces articulations (figure 2) permettent des mouvements plus ou moins importants des vertèbres selon leur localisation, et l'union de ces dernières est assurée par les corps vertébraux, les arcs vertébraux, et une importante masse musculaire réalisant une contention ferme de l'ensemble.

- **L'union des corps vertébraux** est très forte, et est réalisée à la fois par le disque intervertébral (dont les fibres de l'anneau fibreux sont ancrées dans les surfaces articulaires qu'elles solidarissent puissamment) et par les ligaments longitudinaux ventraux et dorsaux.
- **L'union des arcs vertébraux** est réalisée par des articulations synoviales et des ligaments. Les articulations synoviales ont des conformations variables selon les régions, avec des surfaces articulaires très engainantes en région lombaire, limitant fortement les possibilités de rotation et de latéro-flexion, et plus libres en régions cervicales et thoraciques.
- **La contention musculaire** solidarisant le tout, et stabilisant la colonne vertébrale, se fait sur deux plans. Le premier est le plan de la contention rapprochée, assurée par les muscles juxtavertébraux, dont l'innervation proprioceptive très riche permet un réajustage vertébral permanent. Le second est le plan de la contention à distance, assurée par les groupes musculaires épi-axiaux et hypo-axiaux. En région cervicale, ce sont les muscles cervicaux dorsaux et cervicaux ventraux. En région lombaire, ce sont les muscles erector spinae et ilio-psoas. (Denoix and Pailloux, 1997)

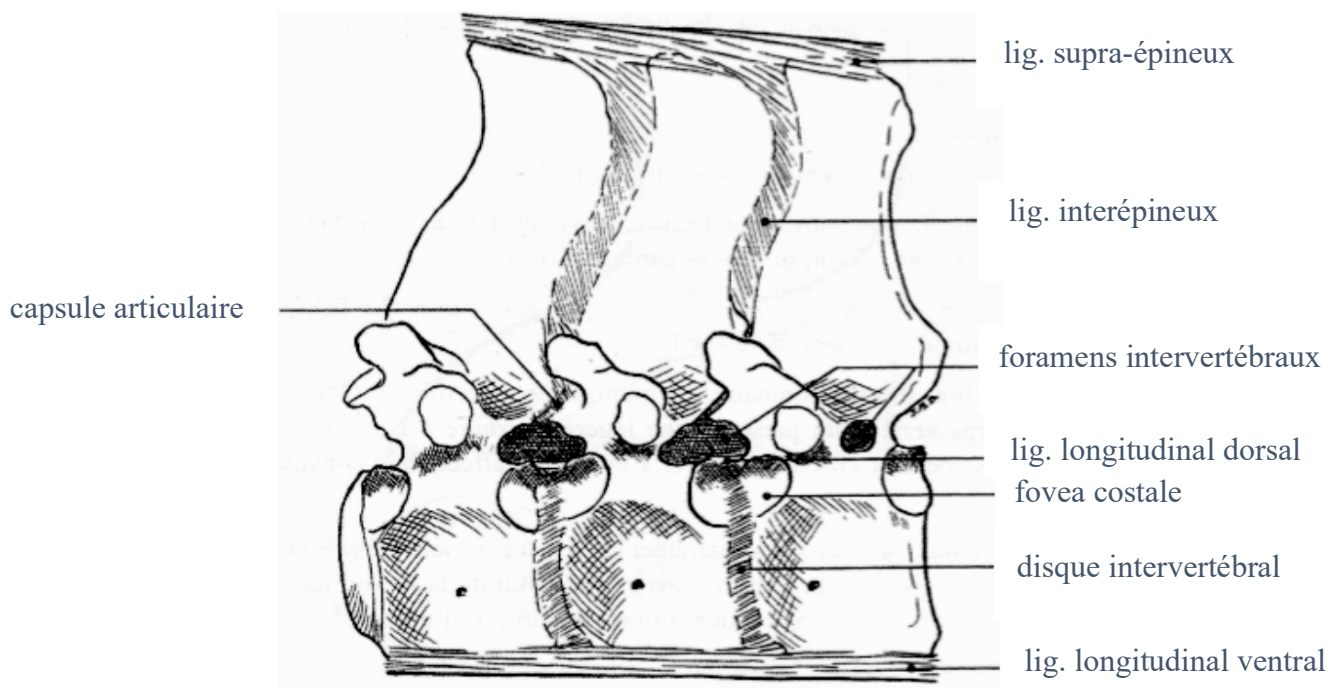


Figure 2 : Articulation intervertébrale thoracique (d'après Denoix)

Ces articulations sont la clé de la mobilité vertébrale. L'amplitude des mouvements des vertèbres conditionne l'amplitude des mouvements du cheval et donc, sa locomotion. Une bonne mobilité vertébrale est donc primordiale pour tout cheval évoluant dans un sport équestre, et nous verrons dans les chapitres suivants qu'une mauvaise adéquation selle-dos du cheval peut être à l'origine d'une réduction de ces mouvements de façon modérée à sévère.

2) Myologie de la colonne vertébrale

Les masses musculaires du dos du cheval sont le support de la selle et du poids du cavalier : leur intégrité est donc primordiale pour qu'un cheval puisse évoluer dans un sport sans douleur lors de l'exercice. L'étude de l'anatomie des muscles qui se retrouvent en relation avec la selle lors du mouvement nous aide à comprendre l'impact que peut avoir l'équipement sur la locomotion du cheval.

Dans la région thoraco-lombaire, on distingue :

- La musculature **juxtavertébrale**, assurant la proprioception statique et dynamique. L'état d'étirement de leurs fibres va moduler l'activité de masses musculaires bien plus développées (muscles paravertébraux).
- Les muscles **paravertébraux**, puissants, ayant un impact déterminant sur la posture ou le mouvement. On peut les classer en deux groupes : les muscles fléchisseurs, situés sous le pont vertébral, et les muscles extenseurs, situés au-dessus. Par ailleurs, tous ces muscles ont un rôle de latéro-flexion et/ou de rotation (lors d'action unilatérale) à des degrés divers.
- Les **fascias**, des membranes fibro-élastiques qui recouvrent ou enveloppent une structure anatomique. (Denoix and Pailloux, 1997)

a) La musculature juxtavertébrale en rapport avec la selle

Ce sont des muscles segmentaires profonds, peu actifs dans la mise en mouvement de la masse, mais ayant un rôle prépondérant dans la contention articulaire intervertébrale et dans le contrôle proprioceptif. Il s'agit essentiellement du muscle multifide (= m. transversaire épineux), formé de multiples faisceaux obliques et chevauchants.

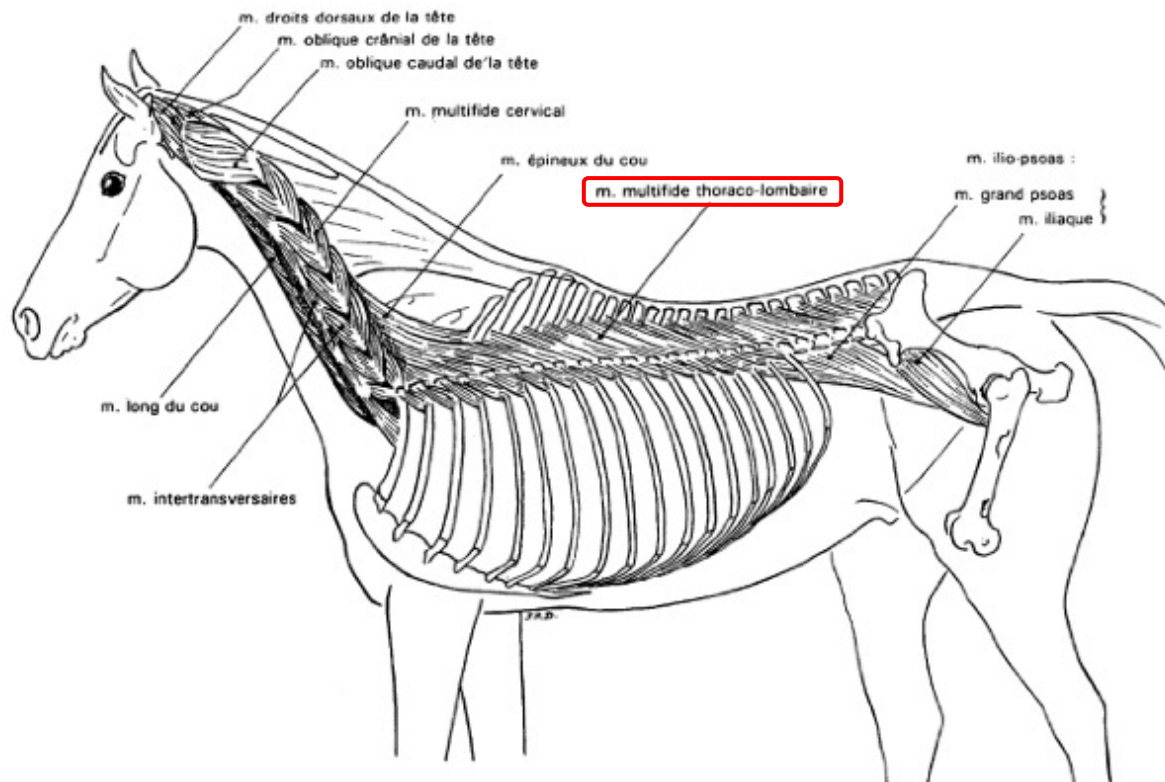


Figure 3 : Muscles juxtavertébraux de l'encolure et du tronc.

(d'après Denoix et Pailloux, 1997)

Ce muscle s'étend des processus transverses des vertèbres thoraciques et lombaires, jusqu'aux processus épineux des 2 à 3 vertèbres en amont. Une dissection de ce muscle a montré que les fibres qui le constituent sont orientées de la même façon chez le cheval et chez l'homme (Stubbs *et al.*, 2006). Il est donc possible d'imaginer que ce muscle joue le même rôle dans les deux espèces, à savoir la contention articulaire et la proprioception.

b) La musculature paravertébrale en rapport avec la selle

i) Les muscles fléchisseurs

Ce groupe musculaire n'est pas en relation directe avec la selle puisqu'ils se situent soit en région lombo-sacrée, soit au niveau de la paroi de l'abdomen, caudalement. Ils sont tout de même cités puisque leur rôle de flexion du pont vertébral est primordial dans la locomotion du cheval. Ils permettent au cheval de « remonter son dos », et donc, de porter le cavalier, tout en engageant ses postérieurs sous la masse. Cette attitude lui permet de travailler de façon saine et

durable. La propulsion du cheval (résultante du travail de la ligne du dessus) n'est possible et harmonieuse que si la qualité de la flexion (ligne du dessous) est bonne.

De plus, une faible sangle musculaire abdominale a été identifiée chez l'homme comme étant associée de façon plus fréquente à des douleurs lombo-sacrées (Kato *et al.*, 2019), et il apparaît légitime de penser qu'il en est de même chez le cheval étant donné l'importance de la sangle abdominale dans la locomotion du cheval (soutient de l'ensemble des viscères, du cavalier ...).

Ces muscles sont les muscles obliques externe et interne, droit de l'abdomen, et transverse de l'abdomen pour ce qui est de la paroi de l'abdomen, et les muscles grand psoas, petit psoas, et carré des lombes pour ce qui est de la région lombo-sacrée. Ils sont peu épais, et leur efficacité sur le plan locomoteur est due à leurs corps musculaires très étendus et au fait qu'ils s'insèrent très loin de l'axe vertébral, ce qui confère un effet de levier important.

ii) Les muscles extenseurs

α) Extenseurs de la colonne thoraco-lombaire

Les extenseurs de la colonne thoraco-lombaire constituent la principale masse musculaire du dos du cheval, avec le muscle erector spinae et ses divisions. C'est un ensemble musculaire volumineux occupant tout l'espace compris entre les processus épineux et les processus transverses thoraciques et lombaires. Il s'étend sur toute la longueur du pont vertébral (figure 4), depuis l'extrémité crâniale du bassin jusqu'à la base du cou. Il se clive en trois plans :

- Le muscle ilio-costal est la plus latérale des divisions du muscle erector spinae. Il s'insère sur le processus transverse de C7, sur l'extrémité dorsale des côtes, et sur les processus transverses lombaires. Il a surtout un rôle lors de l'expiration et de la latéro-flexion thoraco-lombaire.
- Le muscle longissimus lombo-thoracique est la division la plus forte de l'erector spinae. Situé entre les deux autres extenseurs, il s'insère sur l'extrémité proximale des côtes et sur les processus lombaires et thoraciques. C'est un puissant extenseur de la colonne vertébrale qui a également un rôle de latéro-flexion lors de contraction unilatérale.
- Le muscle épineux du thorax est la division la plus médiale. Il est plaqué contre les processus épineux, et recouvre ainsi le muscle multifide. Il est extenseur de la colonne. (Bonati, 2011)

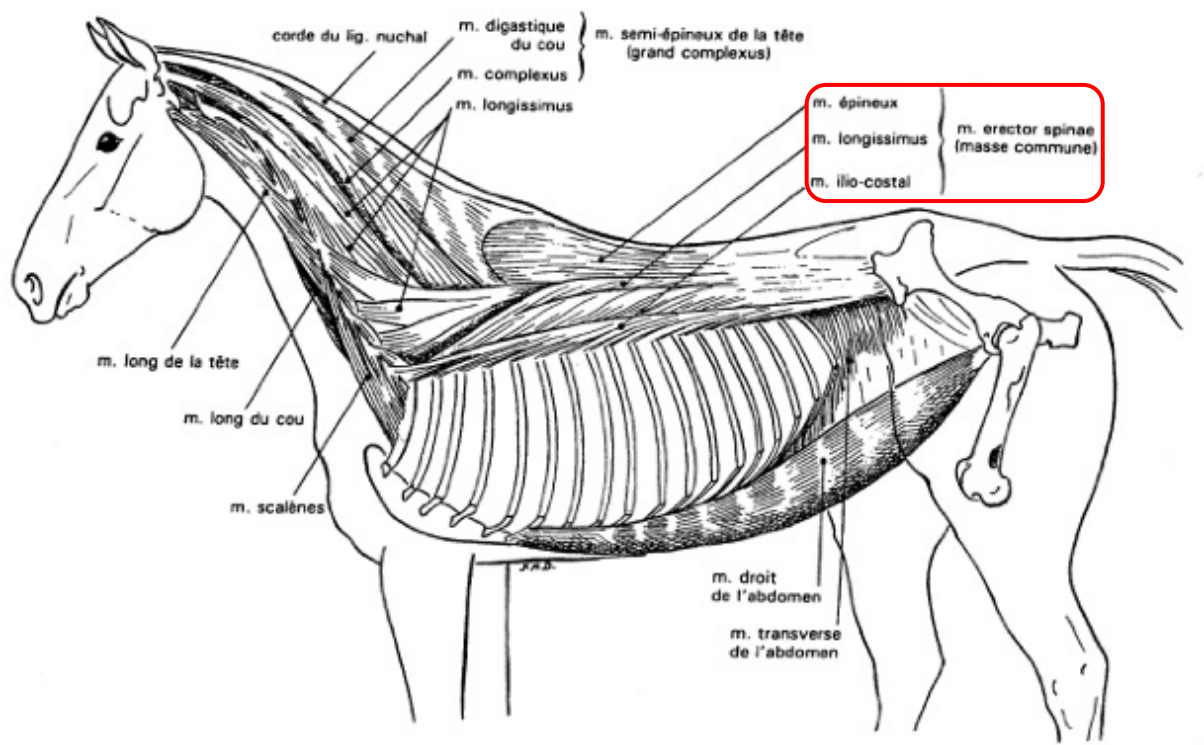


Figure 4 : Muscles de l'encolure et du tronc, plan profond.

(d'après Denoix et Pailloux, 1997)

La selle repose directement sur cette masse musculaire, et les points de pression ou les mouvements exagérés d'une selle non-adaptée auront un impact direct sur l'intégrité des muscles épineux, longissimus, et ilio-costal. Ces systèmes musculaires se prolongent dans l'encolure et constituent les extenseurs de l'encolure.

β) Extenseurs de l'encolure

Les muscles regroupés comme « extenseurs de l'encolure » sont cervicaux dorsaux, et sont les plus puissants de l'encolure : ils luttent en permanence contre la gravité pour maintenir le port dressé de l'encolure et de la tête.

Nous ne détaillerons ici que les muscles en rapport avec la selle, c'est à dire ceux de la région du garrot. Nous retrouvons :

- Le **muscle trapèze**, le plus superficiel, est nettement divisé en deux parties (cervicale et thoracique). Une forte aponévrose s'insérant le long de l'épine scapulaire marque cette division. Seule la partie thoracique est en rapport avec la selle. Il a un rôle d'abducteur de l'épaule, et de rétraction du membre à l'appui lors du mouvement.

- Le **muscle rhomboïde**, recouvert par le trapèze, est plus épais et s'étend beaucoup moins caudalement. Il s'insère sur le bord dorsal de la scapula, et s'étend des premiers processus épineux thoraciques à la corde du ligament nuchal. On lui distingue une partie cervicale et thoracique, et seule la seconde est en rapport avec la selle. Il a un rôle de traction dorsale de la scapula, et de redressement de l'encolure.

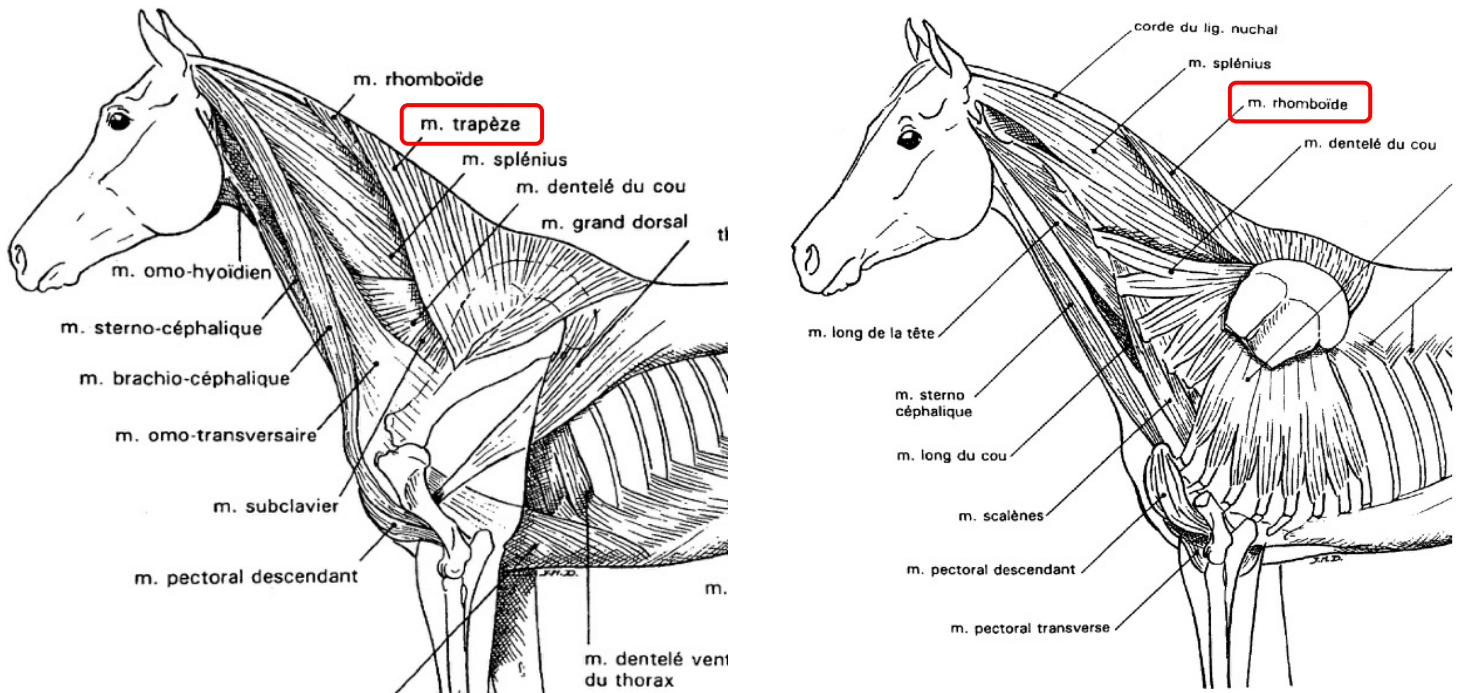


Figure 5 : Muscles de l'encolure et du tronc, plan superficiel (à gauche) et plan moyen (à droite).

(d'après Denoix et Pailloux, 1997)

Le muscle grand dorsal n'est pas à proprement parler un extenseur de l'encolure, mais étant anatomiquement en rapport avec les deux précédents, il est présenté ici. C'est un large muscle plat et triangulaire couvrant toute la région du dos et des lombes. Il présente une large aponévrose couvrant le fascia thoraco-lombaire, et se prolonge par une épaisse partie charnue couvrant la face latérale du thorax. Cette partie charnue s'insinue entre le bras et le thorax pour se terminer par un tendon sur la face médiale de l'humérus. Il a un rôle de rétraction du membre lors de la phase d'appui, en synergie avec les muscles trapèze et pectoral ascendant.

Les muscles grand dorsal et trapèze, qui couvrent les processus latéraux du garrot, peuvent être lésés par une selle trop étroite.

c) Les fascias en rapport avec la selle

Les fascias sont des structures fibro-élastiques recouvrant, ou enveloppant des organes. Le fascia thoraco-lombaire est en relation avec la selle puisqu'il recouvre dorsalement les muscles spinaux depuis la base du cou jusqu'à la région sacrale, où il est prolongé par le fascia glutéal. Il est très épais en région lombaire, mais s'amincit en région thoracique. Il sert notamment d'insertion ou d'union à tous les autres fascias du tronc (aponévrose du grand dorsal, des dentelés dorsaux, tunique abdominale, fascia thoracique externe ...) et sera donc directement affecté en cas de tension ou de stress d'un de ces muscles. Le fascia thoraco-lombaire est également très riche en propriocepteurs et nocicepteurs, semblant ainsi pouvoir être la source de douleurs projetées (Brouard, 2000).

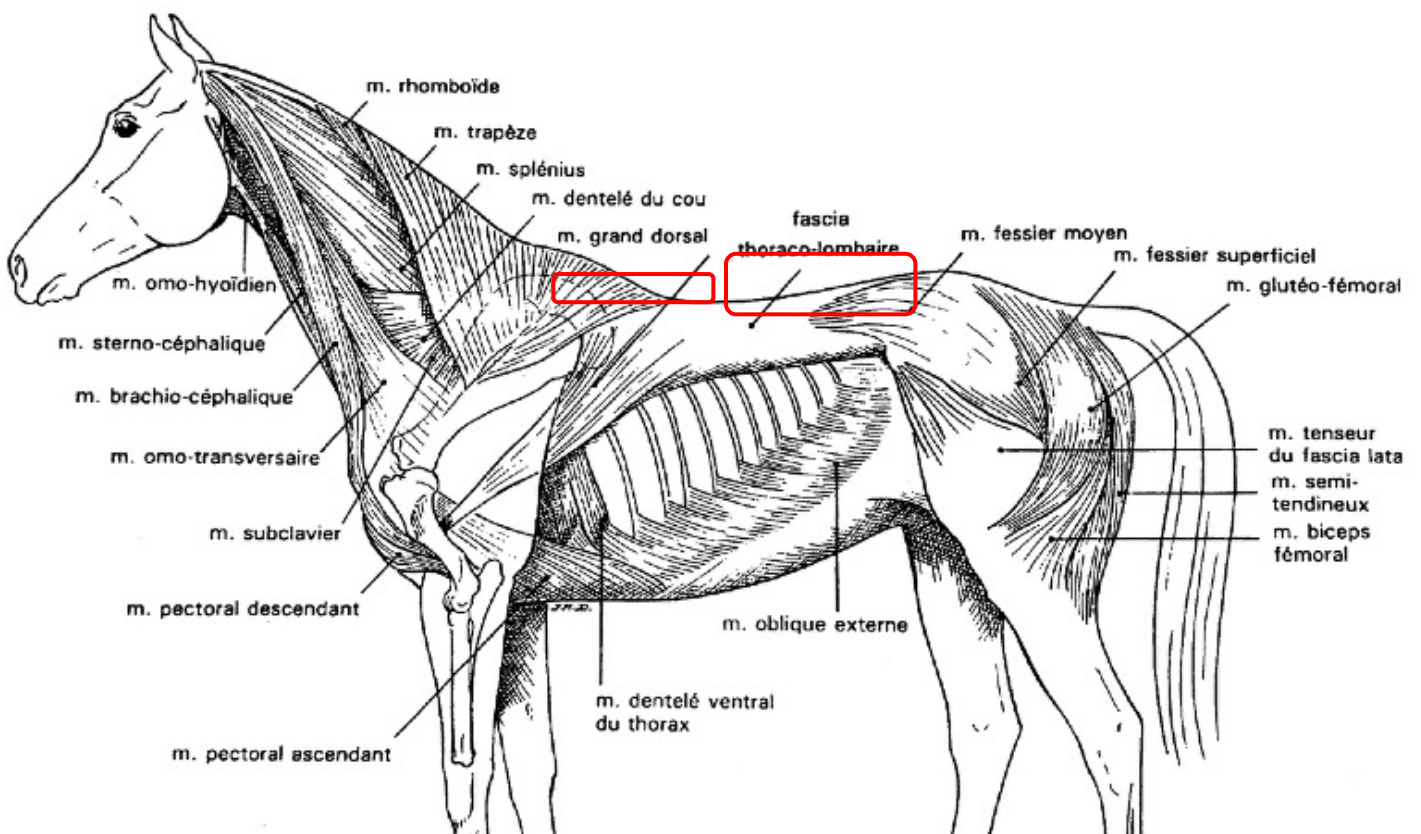


Figure 6 : Muscles de l'encolure et du tronc, plan superficiel.

(d'après Denoix et Pailloux, 1997)

3) Angiologie et neurologie de la colonne vertébrale

a) Vascularisation cutanée

La vascularisation cutanée est assurée par les rameaux cutanés médiaux et latéraux, de très faible calibre. Ce sont ces vaisseaux qui subissent les pressions exercées par la selle et le cavalier en premier. Ils s'organisent en un fin réseau jouant un rôle essentiel dans la nutrition cutanée et la thermorégulation du cheval. On suppose qu'en cas de surpression exercée localement, les capillaires sont occlus. L'ischémie ainsi provoquée aurait pour conséquence des lésions pouvant aller jusqu'à la mort cellulaire et l'apparition de lésions des tissus mous. L'apparition de poils blancs sous une selle inadaptée pourrait s'expliquer par l'atrophie des bulbes pilaires suite à l'ischémie prolongée. La destruction pilaire provoquerait la fuite du pigment mélanique.

La vascularisation cutanée est particulièrement intéressante pour l'étude du dos du cheval et de la selle, puisqu'elle permet d'étudier leurs profils thermographiques. En effet, la chaleur d'un tissu biologique provenant à la fois de son métabolisme et du flux sanguin qui le traverse, il nous est possible d'assimiler la chaleur émise par la peau à son seul flux sanguin, étant donné que le métabolisme cutané est quasi-nul. Il est donc admis que toute variation de température du tissu cutané est consécutive à des changements de la perfusion sanguine par les vaisseaux cutanés (Turner (2009), rapporté par Bonati (2011)). C'est donc le flux sanguin qui détermine le motif thermique. Si les capillaires sont occlus (surpression exercée localement par la selle par exemple), la chaleur émise sera donc bien inférieure au profil thermique physiologique de la région étudiée.

b) Vascularisation musculaire

Les muscles sont irrigués par un réseau vasculaire profond. Il est logique de penser que lorsque les masses musculaires sont comprimées, les capillaires qui les irriguent sont occlus. Il a été montré que pour une valeur de pression mesurée en surface, la pression mesurée en profondeur est plus importante (Todd and Thacker, 1994) et on sait par ailleurs que toute altération du flux sanguin est une cause de douleur musculaire et de crampe (Von Scheinitz, 1999). Une pression élevée peut donc être à l'origine de douleurs musculaires superficielles et profondes.

c) Structures nerveuses

Les muscles dorsaux sont innervés selon un schéma comparable à leur vascularisation. Les filets du système sympathique circulent le long des capillaires sanguins, et c'est ce système qui contrôle la vasomotricité des vaisseaux superficiels. Une irritation nerveuse provoquerait une vasoconstriction réflexe des capillaires cutanés innervés par ce nerf. Il en résulte une hypothermie au niveau de la zone concernée.

Les fibres de conduction de la douleur mises en jeu sont les fibres lentes de type C et les fibres A delta. Chez l'homme, la stimulation de ces fibres évoque des sensations

d'hyperesthésie, de brûlure, de douleur ou encore de mécanoallodynie (intolérance à la pression). Le même phénomène est observé lors de douleurs dorsales chroniques chez le cheval, qui s'expriment par des changements de comportement ou par une altération des mouvements du dos. (Bonati, 2011)

La connaissance de l'anatomie de la région du dos permet de connaître les exigences que la selle devra respecter pour éviter toute douleur ou gêne chez le cheval à l'exercice. Il faudra faire particulièrement attention à préserver les articulations de la colonne vertébrale et leur mobilité (gouttière de la selle), à suivre les courbures naturelles de la colonne, et laisser au garrot suffisamment d'espace pour jouer son rôle de bras de levier. On évitera aussi au maximum les points de pression qui sont délétères pour la vascularisation.

B) Biomécanique du dos du cheval

La biomécanique est l'étude mécanique des mouvements biologiques du corps. La connaissance de l'anatomie et de la biomécanique du dos du cheval sont nécessaires pour la réalisation d'une selle adaptée au dos du cheval. Le dos est l'élément clé de la biomécanique du cheval, et la selle se doit donc d'y être adaptée aussi bien en statique qu'en dynamique. Pour cela, nous nous appuyerons sur les différents modèles utilisés au cours de ces trente dernières années afin de comprendre les mouvements que peut effectuer le dos du cheval, leurs amplitudes, et l'impact que peut avoir un cavalier sur ces derniers.

1) Les modèles et techniques utilisés

Ces trente dernières années, de nombreuses études portant sur le mouvement du dos du cheval et sa dynamique ont été menées. La description des fonctions du dos du cheval et le concept de biomécanique ont évolué au cours du temps. Au 19^{ème} siècle, le concept de « pont » voit le jour, dans lequel les quatre membres constituent les culées (Van Weeren, McGowan and Haussler, 2010). Ce modèle a depuis évolué car il ne prend pas en compte la compression et la tension à « l'intérieur » du pont. Il a donc récemment été remplacé par un concept qui reste aujourd'hui communément admis, qui est celui de « bow-and-string », littéralement « arc et corde ». L'arc représente la colonne thoraco-lombaire, rigide et peu flexible, tandis que la corde représente les tissus mous ventraux (figure 7).

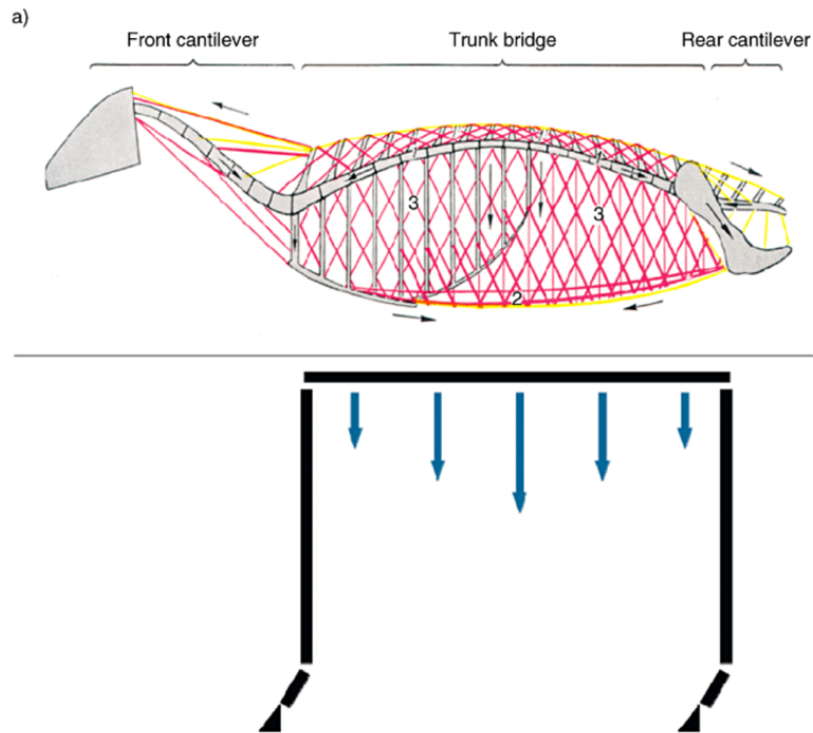


Figure 7 : Modèle du « pont » thoracique chez un cheval debout. Les flèches bleues représentent les forces s'appliquant sur le pont thoracique. (d'après Van Weeren *et al.*, 2010)

Les premières études portant sur le dos du cheval et sa biomécanique ont été réalisées sur des pièces anatomiques (Townsend *et al.*, 1983, Denoix, 1987). Elles mettent en évidence et quantifient les principaux mouvements de la colonne du cheval (flexion/extension, rotation axiale et latéro-flexion).

Des études *in vivo* ont ensuite permis de se rapprocher de la réalité en prenant en compte les masses musculaires décrites dans la partie précédente, structures enveloppant les articulations vertébrales et influençant grandement le mouvement. Les premières études, non invasives, se limitaient à la cinématique du dos dans le plan sagittal (travaux de Audigié *et al.*, en 1999, avec une technique développée par Pourcelot *et al.*, en 1998). L'analyse du dos dans les trois dimensions de l'espace (quantification de flexion/extension, rotation axiale, et latéro-flexion) est apparue quelques années plus tard, notamment à travers les travaux de Licka *et al.* en 2001, et de Faber *et al.*, 2001. Les techniques utilisées seront détaillées plus loin.

L'ensemble de ces travaux permet d'étudier non seulement le mouvement des vertèbres les unes par rapport aux autres, mais aussi les mouvements complexes de la charnière axiale, et donc potentiellement les exigences auxquelles doit répondre la conformation de la selle.

2) Nature des mouvements possibles

a) *Mouvements des vertèbres*

En théorie, six mouvements différents peuvent prendre place dans une articulation intervertébrale (Townsend, Leach and Fretz, 1983), comme décrit sur la figure ci-dessous, issue de leurs travaux :

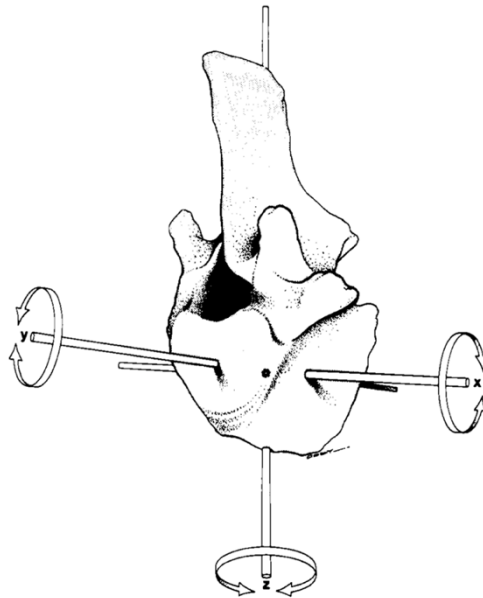


Figure 8 : Vue latéro-crâniale gauche de la 17ème vertèbre thoracique, à laquelle un repère orthogonal droit (x, y, z) est appliqué. (Townsend, Leach and Fretz, 1983)

Les mouvements possibles selon ce repère orthogonal sont :

- Une rotation selon l'axe x qui correspond à une flexion/extension dorso-ventrale
- Une rotation selon l'axe y qui correspond à une rotation axiale
- Une rotation selon l'axe z qui correspond à une flexion latérale
- Une translation ou un mouvement selon l'axe x qui correspond à un cisaillement transverse
- Une translation ou un mouvement selon l'axe y qui correspond à une compression ou une traction longitudinale
- Une translation ou un mouvement selon l'axe z qui correspond à un cisaillement vertical.

Ces articulations congruentes comptent ainsi 3 degrés de liberté, en plus des mouvements de translation dans l'espace. Toutes les vertèbres sont capables de bouger selon ces trois axes sauf en cas de fusion intervertébrale. Les travaux de Townsend et al. en 1983 ont aussi montré que l'amplitude des mouvements de translation était très faible comparée aux amplitudes des mouvements de rotation des vertèbres. Les études de biomécanique du dos du cheval s'étant jusqu'à aujourd'hui concentrées sur les degrés de rotation plus que sur les translations, nous n'avons que très peu de données à leur sujet. Nous les négligerons donc ici,

et nous considérerons que les parties de la colonne vertébrale ne peuvent réaliser que trois types de mouvements.

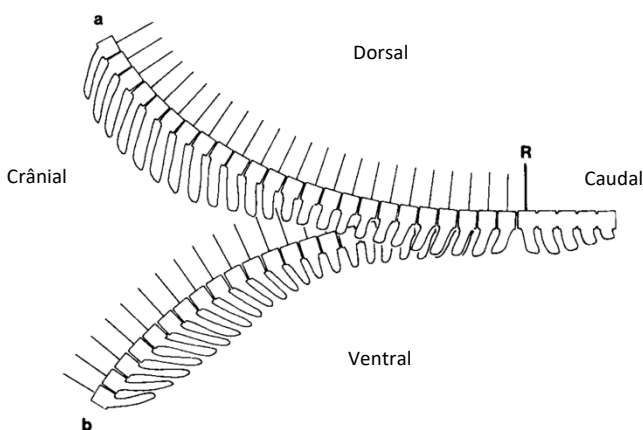
b) Mouvements des charnières thoraco-lombaires

i) Études ex vivo

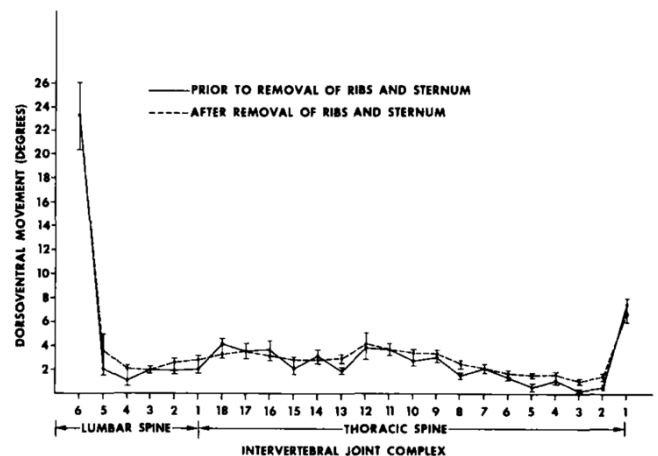
La première étude visant à déterminer la flexibilité globale de la colonne thoracique sur des pièces anatomiques date de 1980. Jeffcott and Dalin, en 1980, ont utilisé 5 pièces de dissection, en retirant les membres, les vertèbres cervicales, la cage thoracique, et les muscles épi-axiaux. Leur protocole montre que les mouvements de latéro-flexion et de rotation axiale sont quasi-inexistants caudalement à T13, et que l'amplitude des mouvements de flexion-extension diminue crânio-caudalement entre T10 et L1.

Cette première étude comporte cependant des biais importants, à la fois dans la réalisation du protocole, et dans la lecture des mesures : les contraintes imposées pour reproduire les mouvements de la colonne sont très éloignées des conditions physiologiques, et la lecture des résultats ne tient pas compte de la distance entre les points de mesure et les centres instantanés de rotation.

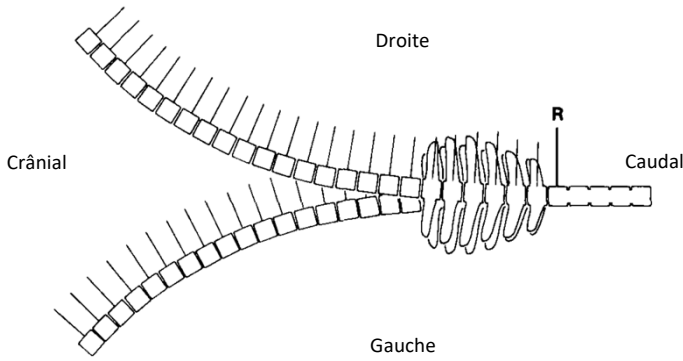
D'autres études ont suivi, (Townsend *et coll.*, 1983, et Denoix, 1987), utilisant eux aussi des pièces de dissection, mais avec des protocoles différents, et reproduisant des conditions plus proches des conditions physiologiques. Les mouvements de flexion-extension, latéro-flexion, et rotation axiale sont testés indépendamment (figure 9A à 9F), et les données sont analysées statistiquement.



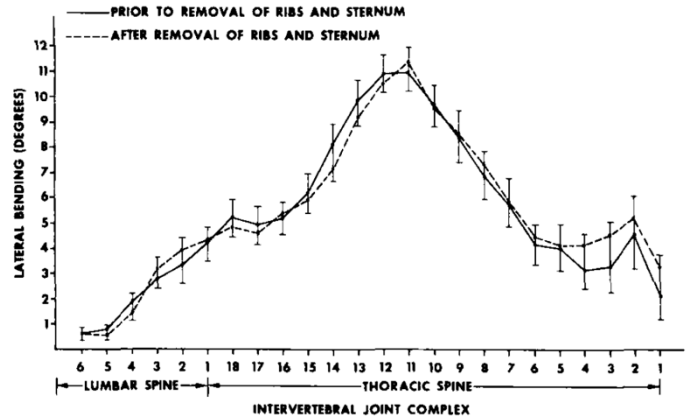
A- Représentation schématique de la méthode utilisée pour simuler et analyser les mouvements de flexion (a) et d'extension (b) de la colonne thoraco-lombaire du cheval. (R = Aiguille de référence dans le sacrum)



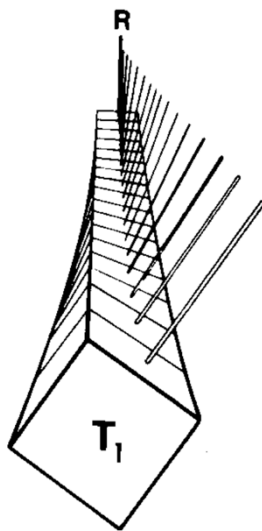
B- Comparaison des mouvements de flexion-extension de la colonne avant (8 individus) et après (13 individus) l'ablation des côtes et du sternum.



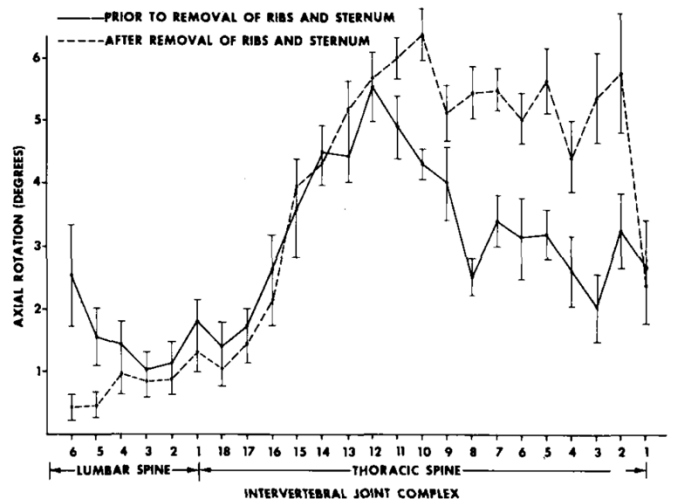
C- Représentation schématique de la méthode utilisée pour simuler et analyser les mouvements de latéoflexion de la colonne thoraco-lombaire du cheval. (R = Aiguille de référence dans le sacrum)



D- Comparaison des mouvements de latéoflexion de la colonne avant (8 individus) et après (13 individus) l'ablation des côtes et du sternum.



E- Représentation schématique de la méthode utilisée pour simuler et analyser les mouvements de rotation axiale de la colonne thoraco-lombaire du cheval. (R = Aiguille de référence dans le sacrum; T1 = première vertèbre thoracique)



F- Comparaison des mouvements de rotation axiale de la colonne avant (8 individus) et après (13 individus) l'ablation des côtes et du sternum.

Figure 9 : Protocole et résultats expérimentaux de Townsend et coll., 1983.

Ces travaux confirment tout d'abord que 3 mouvements différents ont lieu dans chacune des articulations de la colonne thoraco-lombaire (à condition qu'elles ne soient pas fusionnées).

Il est ensuite montré que les mouvements de flexion-extension sont les plus amples au niveau de l'articulation lombo-sacrée, et des premières vertèbres thoraciques (Townsend, Leach and Fretz, 1983). Dans une moindre mesure, des déplacements dorso-ventraux sont présents autour de la jonction thoraco-lombaire pendant la flexion et l'extension forcée. Les zones les plus rigides sont localisées aux extrémités, entre T3 et T9, et L2 et L5 (Denoix, 1987). Les mouvements de latéro-flexion et de rotation axiale, eux, sont observés dans toute la colonne thoraco-lombaire, avec un maximum d'amplitude au milieu du dos, respectivement en T11-T12 et entre T9 et T14 (Townsend, Leach and Fretz, 1983).

Ces études sur pièces anatomiques fournissent une base solide, mais restent insuffisantes pour apprécier la globalité du mouvement du dos du cheval lors de l'exercice. Des études cinématiques (in vivo) ont permis de se rapprocher de la réalité.

ii) Études cinématiques in vivo

Les études in vivo de la locomotion du cheval sont plus difficiles à réaliser que les études sur pièces anatomiques car les muscles qui entourent la colonne vertébrale réduisent considérablement l'accès aux vertèbres et à leurs mouvements. À cela s'ajoute le fait que les mouvements étudiés sont très faibles et complexes, c'est pourquoi ce type d'étude peut rapidement s'avérer complexe à mettre en place, et onéreuse.

Les études de cinématique peuvent être réalisées de différentes manières, mais elles reposent toutes sur le même principe : on traite informatiquement des données qui sont récoltées lors du mouvement du cheval grâce à des capteurs positionnés sur les organes à analyser. Ces données peuvent être obtenues avec des marqueurs non invasifs (ce qui consiste à déposer sur la peau des marqueurs sphériques réfléchissants dont le déplacement est suivi), ou avec des capteurs invasifs (ce qui consiste à implanter des aiguilles de types « Steinmann » dans les processus épineux des vertèbres sous anesthésie locale, et à positionner des marqueurs à l'extrémité de ces aiguilles pour faciliter la récolte des données).

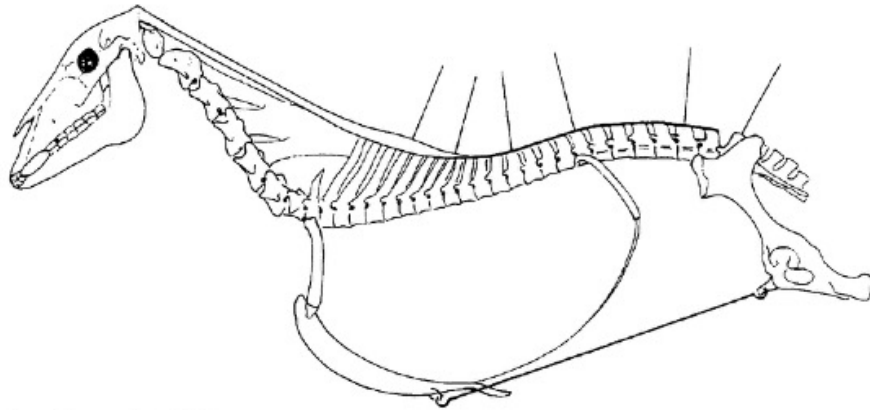
Les résultats des études in vivo sont similaires à ceux obtenus avec les études sur pièces anatomiques, notamment en ce qui concerne les régions de mobilité privilégiées. On montre en effet que la jonction lombo-sacrée est particulièrement mobile en flexion-extension. Ces mouvements de flexion-extension sont les plus amples comparés aux autres types de mouvements possibles (Licka, Peham et Zohmann, 2001). Leurs travaux ont permis d'établir les mouvements 3D de base sur 22 chevaux sains au pas et au trot, et il montre ainsi que les déplacements maximums sont observés en L3 au pas, et en T5 au trot (entre 2,8° et 4,9° de déplacement en flexion-extension). Ces mouvements spinaux sont d'ailleurs bien moins importants au trot qu'aux autres allures, ce qui peut s'expliquer par le gainage du dos qui a lieu lors de cette allure symétrique et sautée, nécessitant une tonicité importante (Faber *et al.*, 2001). Pour ce qui est de la rotation axiale et la latéro-flexion, les plus grandes amplitudes sont observées au niveau des vertèbres thoraciques moyennes (entre 1,9° et 3,6° en latéro-flexion).

Il faut cependant garder à l'esprit que les mouvements qui ont lieu dans la colonne vertébrale du cheval et leurs amplitudes peuvent être influencés par différents facteurs, tels que le niveau d'épreuve auquel il évolue (Cassiat *et al.*, 2004), ou la position du complexe tête-encolure.

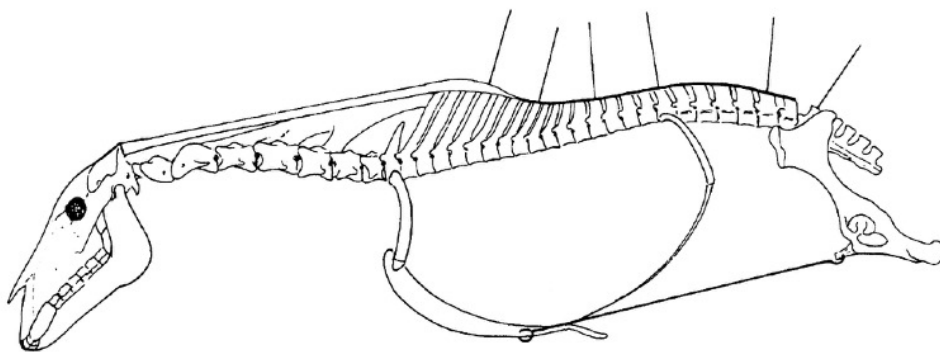
3) Effet et importance de l'encolure dans la biomécanique du cheval

Le complexe tête-encolure joue un rôle majeur dans la locomotion du cheval, et doit donc être intégré dans l'étude de sa biomécanique dorsale. En effet, ce complexe agit comme un balancier permettant au cheval d'équilibrer son poids du corps lors du déplacement, et est la région de la colonne cervicale la plus mobile.

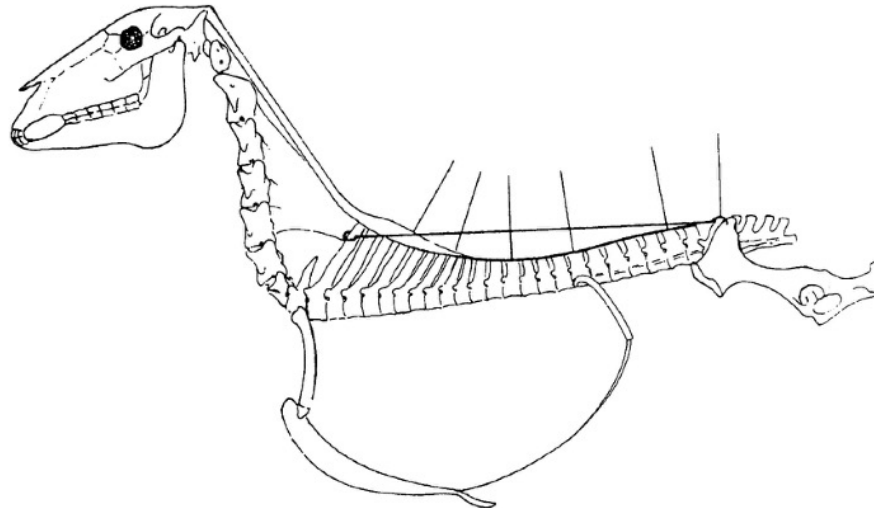
Les travaux de Denoix en 1987 se sont intéressés aux rapports entre la position de l'encolure et la mobilité de la colonne vertébrale. Il montre que l'abaissement de l'encolure entraîne une traction sur le ligament nuchal, qui tire les processus épineux vers l'avant, et résulte en une flexion de la colonne thoracique, plus prononcée entre T6 et T10. Ces déplacements plus importants entre T6 et T10 peuvent être dus à une élasticité encore suffisante du ligament supra-épineux dans cette région qui est couplée à une diminution de la taille des processus épineux.



a) Flexion thoraco-lombaire



b) Flexion cervicale et thoraco-lombaire



c) Extension cervicale et thoraco-lombaire

Figure 10 : Illustration du protocole expérimental utilisé par Denoix en 1987, utilisant des pièces anatomiques et des tendeurs.

La traction vers l'avant du ligament nuchal met également sous tension le ligament supra-épineux, ce qui verrouille la région lombaire. L'abaissement de l'encolure a donc un effet non négligeable sur la mobilité de la région thoraco-lombaire. La position de l'encolure joue un rôle important dans la mobilité des différents segments de la colonne vertébrale.

C) Effet du cavalier et de la selle sur la biomécanique du dos du cheval

L'étude de la biomécanique du cheval de sport ne peut pas se limiter au cheval évoluant sans cavalier. Il est important d'étudier l'interaction entre le cavalier, la selle, et le cheval pour mieux appréhender les relations entre les différentes parties, chacun de ces trois éléments ayant une influence sur les deux autres. La compréhension fine de ces interrelations pourrait mener à une meilleure compréhension de l'interaction cavalier-cheval, et donc à une meilleure préparation physique de ce dernier.

1) Effet du poids du cavalier

Le cheval qui évolue sous la selle du cavalier doit porter le poids de l'ensemble lors de son déplacement. Ce poids supplémentaire, localisé sur une zone restreinte de la région thoracique, a un effet direct sur le système musculo-squelettique du cheval. Si on se réfère au modèle d'arc et de corde que nous avons évoqué page 32, placer du poids supplémentaire sur la colonne de l'animal entrainera directement une extension de la colonne thoraco-lombaire.

Patricia de Cocq, en 2012, a essayé de caractériser cet effet du poids du corps en observant des chevaux évoluer au pas, au trot, et au galop sous quatre conditions différentes : cheval sans harnachement, cheval avec un harnais, cheval avec une selle seule, et enfin cheval avec une selle et un chargement de 75 kg fixé sur la selle. Les résultats de cette étude montrent qu'un harnais ou une selle n'ont aucune influence sur les paramètres mesurés au pas, au trot, et au galop lors de cette étude. Seule la condition « selle avec chargement de 75 kg » a une influence sur la locomotion du cheval, avec laquelle on observe une extension lombo-sacrée plus importante sans modification de l'amplitude de mouvement. Une augmentation de la rétraction des antérieurs est également observée au trot, ce qui pourrait être la résultante d'une compensation de l'extension dorsale induite pour le poids supplémentaire. Cette extension semble intuitive lorsqu'on surcharge le dos, mais elle est confirmée par cette étude, et pourrait contribuer à l'apparition de conflits de processus épineux dans la région thoracique.

Peham *et al.*, 2004, s'est lui aussi intéressé à l'effet du cavalier sur la biomécanique du dos du cheval. Ses travaux montrent que la variabilité de la vitesse et de l'accélération dans l'axe longitudinal est diminuée lorsque le cheval est monté, et ce, que la selle soit adaptée au dos du cheval ou non. Ces résultats suggèrent que la présence du cavalier pourrait avoir tendance à stabiliser l'allure du cheval qu'il monte.

Ces études soulignent également que la biomécanique du mouvement du cheval sous la selle ne peut pas être comparée à celle d'un cheval non monté et proportionnellement plus lourd (auquel on rajouterai le poids du cavalier). Les travaux de Clayton *et al.* (1999) ont confirmé cela en comparant la force de réaction du sol pour des chevaux montés et non montés. Il observe que la valeur absolue du pic vertical de la force de réaction du sol augmente dans le cas d'un cheval monté. Mais si l'on normalise cette valeur avec le poids du cavalier, la valeur absolue du pic vertical de cette force devient plus basse que dans le cas d'un cheval non monté. Cela confirme bien qu'un cheval monté n'est pas équivalent à un cheval non monté proportionnellement plus lourd.

2) Effet de l'expérience du cavalier

Un second facteur ayant de grandes chances d'influencer la locomotion du cheval est l'expérience du cavalier. Un cavalier expérimenté est capable de maintenir son buste droit et de suivre harmonieusement les mouvements de sa monture, d'avoir des jambes fixes et de garder un bon équilibre tandis qu'un cavalier débutant aura tendance à pencher son buste vers l'avant (ce qui modifie la distribution des forces sous la selle), et à avoir un équilibre plus fluctuant et des jambes moins fixes. L'expérience du cavalier va influencer grandement les performances du cheval.

Peham *et al.* (2004) a déjà montré que le mouvement du cheval était plus régulier lorsqu'il était monté par un cavalier. Lagarde *et al.* (2005) utilise de la cinématique 3D pour caractériser les différences de biomécanique du cheval selon l'expérience du cavalier qui le monte. Il démontre qu'un cavalier avec une bonne expérience présente une synchronisation parfaite et continue avec les mouvements du cheval, là où un cavalier débutant a un mouvement décalé et ne suit pas les oscillations de sa monture. Il montre surtout que l'augmentation de la régularité des oscillations du tronc de l'animal est bien plus importante avec un cavalier

expérimenté. La synchronisation avec l'animal s'acquiert donc avec la pratique, et joue un rôle important dans l'harmonie entre les deux parties lors du mouvement.

Terada (2000) montre, d'après les résultats d'EMG réalisés sur un cheval monté par plusieurs cavaliers de niveaux différents, que l'instabilité du haut du corps d'un cavalier inexpérimenté provoque des désordres dans l'équilibre entre les chaînes musculaires ventrales et dorsales. C'est une instabilité qu'on ne retrouve pas avec un cavalier expérimenté, et l'équilibre entre les chaînes musculaires ventrale et dorsale est fondamental pour que le cheval se muscle correctement et durablement, afin de performer.

Une étude plus récente (Greve and Dyson, 2014) s'est également intéressée au ressenti des cavaliers, en essayant de mettre en évidence des associations entre les données issues d'analyses de terrain ($n = 506$) et celles issues de questionnaires remplis par les cavaliers ($n = 205$). La morphologie du dos du cheval y était notamment reportée sur papier, en utilisant une règle flexible à mémoire de forme, et en la tournant à 180° dans le plan horizontal afin de juger de la symétrie axiale du dos du cheval. Cette étude montre que les petites asymétries du dos du cheval sont positivement associées aux mauvaises adaptations de la selle au dos du cheval, tandis qu'elles sont négativement associées au niveau d'équitation du cavalier. On note par ailleurs que les données issues des questionnaires sont, pour une grande partie, différentes des données issues de la clinique. Cela montre qu'une meilleure sensibilisation des cavaliers à ce sujet serait nécessaire pour améliorer le confort de travail des chevaux.

3) Effet de la technique de trot utilisée

Au trot, le cavalier a le choix entre différentes techniques de trot : il peut trotter au trot assis, au trot enlevé, ou en suspension, et les contraintes pour le dos du cheval sont différentes en fonction de la technique utilisée. Roepstorff *et al.*, (2009) a étudié la force de réaction du sol et la biomécanique du cheval au trot selon les différentes techniques utilisées par le cavalier. Il trouve que la force de réaction du sol est plus importante durant le trot assis comparé aux phases de suspension au trot enlevé. Les mêmes résultats sont rapportés par de Cocq *et al.*, (2010) qui s'intéresse à l'accélération du centre de masse du cavalier, exploitée grâce à une étude cinématique, et exprimant les forces normalisées avec le poids du cavalier. On observe deux pics de force dans les données récoltées, qui correspondent aux deux phases de la foulée. La force verticale moyenne est identique que ce soit au trot assis ou au trot enlevé ($0,96 \pm 0,09$). Cependant, on note qu'au trot assis, les deux pics de force ont des valeurs proches ($2,54 \pm 0,30$ et $2,92 \pm 0,29$) tandis qu'au trot enlevé, un pic est bien plus important que l'autre ($3,11 \pm 0,39$ lorsque le cavalier s'assoit dans sa selle, contre $1,95 \pm 0,34$ lorsqu'il est en équilibre debout sur ses étriers lors de la phase de suspension). Ces résultats vont dans le même sens que les études de Peham *et al.* (2008 et 2009) qui utilisaient un tapis capteur de pression.

On obtient alors des amplitudes de flexion-extension en région lombaire (maximums observés en L3-L5) qui augmentent lors du travail assis comparé au trot enlevé. Le trot assis est donc une technique qui sollicite plus fortement le dos du cheval, et devrait donc être limitée au strict minimum pour les jeunes chevaux qui ne sont pas encore habitués au poids du cavalier et les chevaux dorsalgiques, ou en phases de réhabilitation d'épisodes douloureux en région dorsale.

II) Adaptation de la selle au dos du cheval : le *saddle fitting*, état des lieux et perspectives actuelles

La selle est une structure plus ou moins rigide selon sa construction, et dont le rôle principal est de servir d'interface entre deux êtres vivants dynamiques. Elle doit permettre l'échange d'informations menant à une compréhension entre les deux parties, notamment grâce à l'assiette du cavalier, son poids du corps, et ses aides. La selle doit également être confortable pour le cavalier (qui pourra passer jusqu'à 8h par jour assis dessus), et être adaptée au cheval afin de ne pas gêner ses mouvements ou induire des dorsalgies, et donc optimiser ses capacités sportives.

A) Structure de la selle

Tous les constituants de la selle sont importants dans la bonne adaptation de cette dernière. Il est donc important de prêter attention aux détails lors de l'observation d'une selle, et de connaître l'ensembles des constituants susceptibles de gêner le cheval.

1) Les différents types de selle

Selon les disciplines pratiquées et l'utilisation prévue, on distingue communément trois types de selle :

- les selles western, confortables et robustes, utilisées essentiellement pour la monte western.
- les selles anglaises, celles que l'on trouve le plus facilement. Plusieurs déclinaisons existent en fonction des disciplines : selle d'obstacle, de dressage, d'endurance ...
- les selles sans arçons.

Nous ne nous intéresserons, pour cette étude, qu'aux selles anglaises, qui sont les plus largement utilisées. Les mesures seront réalisées avec des selles de CSO, mais toutes les selles anglaises sont constituées de la même façon : seule la forme individuelle des pièces composant la selle change. Le processus de fabrication reste inchangé, donc ce qui est évalué pour les selles d'obstacles sera transposable aux autres selles anglaises.

2) Les constituants de la selle

a) *L'arçon*

L'arçon joue le rôle de « squelette » de la selle, et détermine la forme, le comportement dynamique et la résistance mécanique de la selle. C'est la pièce la plus importante de la selle,

et une selle avec un arçon cassé ne pourra pas être utilisée. Il doit être assez rigide longitudinalement pour préserver la colonne vertébrale, et assez souple transversalement pour suivre les mouvements des masses musculaires.

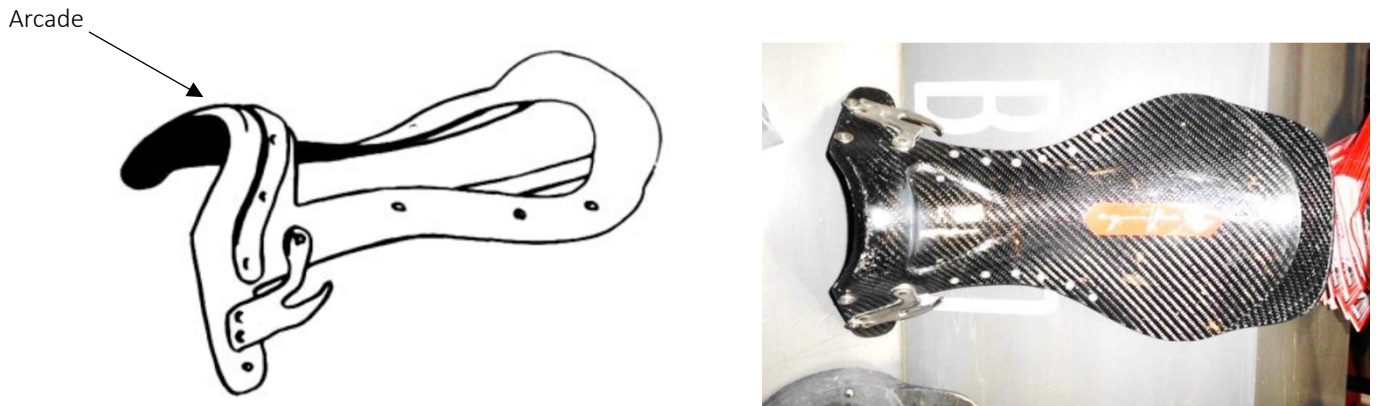


Figure 11 : Arçons de selle anglaise (vue de $\frac{3}{4}$ face, et vue du dessus) (d'après Cottureau)

L'arçon peut être fabriqué à l'aide de composites différents, et ses propriétés varieront en fonction des matériaux utilisés. L'arçon en bois est le plus ancien. Il est généralement composé de bois lamellé collé, et est dit « souple » car ces arçons sont généralement plutôt déformables. Il peut également être moulé synthétique (polyuréthane, résine, carbone, ou alliage de ces différents matériaux), plus ou moins rigides selon le matériau utilisé, mais également plus ou moins cher. Les arçons récents et innovants sont dits « flexibles ». Une étude de Latif *et al.* en 2010, s'intéressant aux chevaux de course, compare une selle avec un arçon en bois, une selle avec un arçon flexible, et une selle sans arçon. Au cours des mesures, les pressions les mieux réparties sous la surface de la selle sont enregistrées par celle avec l'arçon flexible. Ce type d'arçon serait donc intéressant pour les chevaux de course, et une étude similaire chez des chevaux de sport pourrait être intéressante afin de savoir si ces valeurs sont transposables aux différentes disciplines.

La recherche sur les compositions des selles ne cessant d'évoluer, on peut aujourd'hui réaliser des arçons sur mesure.

L'arcade est une pièce maîtresse de l'arçon. C'est un élément crucial de la solidité de l'arçon qui doit être adapté à chaque cheval : trop grande, l'ouverture de l'arcade touchera le haut du garrot. Trop petite, elle comprimera latéralement les masses musculaires.

b) Les couteaux

Ils sont repérés sur la figure 12 ci-dessous sous le nom de « porte-étrivière ».

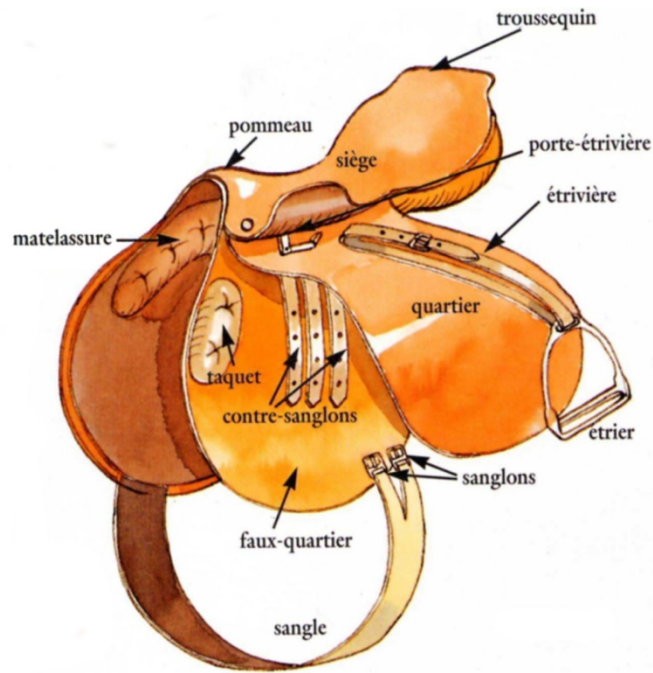


Figure 12 : Les principaux constituants de la selle.

(Source : manuels officiels de préparation aux brevets fédéraux)

Les couteaux d'étrivières sont des pièces métalliques solidaires de l'arçon, qui supportent les étrivières et donc, une grande partie du poids du cavalier. Leur position par rapport à l'assise du cavalier va impacter directement la position de la jambe du cavalier, donc sa position à cheval. Ainsi, ils doivent impérativement être pris en considération dans l'adaptation de la selle, que ce soit l'adaptation au dos du cheval pour ne pas comprimer ou gêner les masses musculaires dorsales, ou l'adaptation au cavalier pour lui assurer une position correcte et confortable. Il existe aujourd'hui des couteaux d'étrivières réglables, permettant d'ajuster au mieux ces derniers en fonction du cavalier et du cheval.



Figure 13 : Couteau d'étrivière réglable. (d'après Cottereau)

c) Les quartiers

Les quartiers sont apparus initialement pour protéger la jambe du cavalier de la sueur du cheval. Il est donc tout à fait possible de monter avec une selle sans quartiers. Ils ont aujourd'hui bien évolué, et servent surtout à orienter la position de la jambe et garantir sa stabilité grâce aux différents taquets. On distingue sur une selle classique le petit quartier (recouvrant les couteaux d'étrivières), le grand quartier (contre lequel repose la jambe, il recouvre la sangle et les contre sanglons), et le faux quartier (entre le cheval et les contre sanglons). Leur taille peut varier, selon la taille du cavalier et ses préférences.

Des selles sans quartiers, ou mono quartier ont fait leur apparition sur le marché au cours de ces 10 dernières années. Les selles sans quartier (Podium Extra Light ou Butet Practice par exemple, figure 13) sont principalement utilisées pour l'entraînement ponctuel, en éduquant le cavalier à stabiliser sa jambe sans artifices pouvant l'aider sur la selle. Certains cavaliers les utilisent quotidiennement, pour gagner du poids en endurance par exemple (avec la Podium Extra Light), ou parce qu'ils apprécient ces selles et ont une meilleure attitude à cheval avec (Butet Practice), mais cela reste peu répandu. Les selles mono quartier sont en revanche très fréquemment rencontrées dans les différentes disciplines sportives, puisqu'elles permettent un contact plus étroit et plus fin de la jambe avec le cheval (une couche en moins entre le flan du cheval et la jambe du cavalier). C'est apprécié par de nombreux cavaliers qui les utilisent classiquement tous les jours.



Figure 14 : Exemples de selles sans quartiers. La Podium Extra Light (à gauche) pour l'endurance, et la Butet Practice (à droite) pour le saut d'obstacle. (Source : Butet)

d) Les taquets

Les taquets sont des renforts en relief ayant pour fonction principale de caler la jambe du cavalier. On peut en retrouver sur le grand quartier et sur le faux quartier, et ils ont des formes et tailles différentes selon la discipline (plutôt fins et longs en dressage, courts et épais en obstacle) et selon les préférences individuelles.

e) Les panneaux

Les panneaux sont situés sous la selle, et doivent reposer à plat sur la musculature dorsale du cheval. Ils sont constitués d'une matelassure importante, et déterminent les capacités amortissantes de la selle. Ces matelassures sont généralement bourrées de mousse, de laine de verre ou de feutre. Elles forment également, au milieu, la gouttière, qui permet de dégager un espace sans appui pour la colonne vertébrale du cheval.

f) Les contres sanglons

Les contres sanglons sont des lanières de cuir percées permettant l'attache de la sangle de chaque côté de la selle, pour maintenir cette dernière stable sur le dos du cheval. Ils sont généralement présents au nombre de trois. Leur position et leur orientation cranio-caudale détermine en partie les forces de pression exercées par la selle sur le dos du cheval.

g) La sangle

La sangle permet de maintenir la selle en place, en passant sous le cheval, et en fixant les sanglons dans les contres sanglons de chaque côté (figure 12). Différents sanglages existent : long (avec une sangle courte, essentiellement sur les selles de dressage, mais retrouvé par exemple sur la selle Practice de Butet, figure 13), permettant de s'affranchir d'une couche de cuir entre la jambe du cavalier et le flanc du cheval. Le sanglage court, avec une sangle longue, pour la majorité des selles d'obstacle.

L'écrasante majorité des sangles que l'on trouve sur le marché aujourd'hui sont des sangles élastiques, c'est à dire qu'une partie élastique est intercalée entre l'extrémité de la sangle et les sanglons. Cela facilite sa mise en place, mais peut amener le cavalier à la serrer de façon trop importante, et comprimer ainsi le thorax et les muscles pectoraux. Ces muscles, recouvrant le sternum, sont très importants dans la locomotion du cheval. Harman, en 1995, rapporte des cas de chevaux douloureux malgré le traitement efficace de leur dorsalgie, qui, en réalité, souffraient de la région du sternum. On veillera donc à bien positionner la sangle, et à la serrer raisonnablement pour éviter que la selle ne recule tout en préservant les muscles de la région du sternum.

3) Les missions de la selle

L'assemblage de ces différents constituants permet la fabrication d'une selle, après 35 à 80 heures de travail environ. La selle, en plus de sa fonction de support du cavalier, joue des rôles majeurs auxquels il faudra être particulièrement attentif. Elle doit :

- Épargner la colonne vertébrale de toute pression, sur l'ensemble de sa longueur et de sa largeur, y compris la région du garrot. Une selle qui ne permet pas à la colonne vertébrale de bouger librement lorsque le cavalier est en selle est mal conçue, ou inadaptée au cheval en question.
- Répartir de façon homogène les pressions engendrées sur le dos du cheval par le poids du corps de son cavalier et son mouvement. Cette répartition des pressions doit se faire sur la plus grande surface possible.
- Équilibrer le cavalier, en lui permettant de se verticaliser naturellement au centre de la selle et de fonctionner dans l'économie gestuelle, la selle restant stable à toutes les allures.

Ces points devront être impérativement pris en compte dans le choix de la selle par le cavalier, faute de quoi des altérations durables de la locomotion de son cheval se mettront en place. L'adaptation de la selle doit être une priorité dans le choix de cette dernière, et l'évaluation de cette adaptation passe par l'observation de critères précis.

B) Importance du *saddle fitting* dans la médecine vétérinaire actuelle

1) Historique et définition

Le *saddle fitting*, que l'on peut traduire en français par « ajustement de la selle » (saddle = selle, to fit = ajuster), a pris de l'importance à la fin du XXème siècle. Avec l'arrivée de l'équitation de loisir dans les années 1960, et la prolifération des selliers, on observe un intérêt grandissant de la part des cavaliers, notamment professionnels, pour la performance associée à la selle. Les études scientifiques s'intéressant à la selle et à la performance se développent à partir des années 1990, et sont de plus en plus nombreuses aujourd'hui. Progressivement, les selliers ont cherché à rendre leurs produits plus ergonomiques, plus techniques, et plus performants.

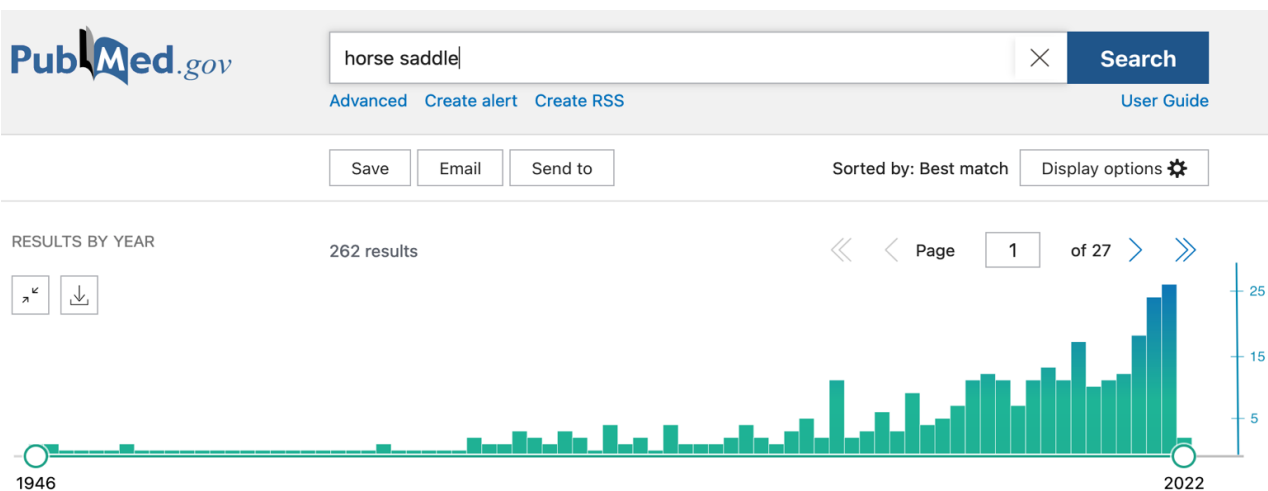


Figure 15 : Nombre de publications répondant à la recherche « horse saddle » enregistrées dans Pub Med par année, entre 1946 et avril 2022.

Le *saddle fitting* est une discipline qui consiste en l’adaptation de la selle et de ses accessoires au cheval, au cavalier, et à leur discipline. Pour cela, les principales missions de la selle doivent être prises en compte, et analysées en fonction des deux individus concernés : la protection de la colonne vertébrale du cheval, la répartition homogène du poids du cavalier, et la stabilisation de ce dernier permettant une équitation la plus fine possible. Ce sont les priorités du *saddle fitter*.

Les chevaux présentent une incroyable diversité de conformation de dos. Chaque individu est différent, et une selle qui convient à un cheval donné pourra donc être totalement inadaptée à un autre évoluant au même niveau. De plus, la conformation d’un même cheval peut varier au fil du temps : un cheval en croissance, un cheval qui développe ses masses musculaires ou au contraire, un cheval dont les masses musculaires régressent verront la morphologie de leur dos différer. L’âge, l’intensité et le type de travail, les éventuelles périodes de convalescences seront donc autant de facteurs qui influenceront la morphologie du dos d’un cheval, et ces individualités de conformations sont à l’origine du développement de cet aspect « *saddle fitting* » du monde de la sellerie.

Nous allons voir dans les prochains paragraphes comment évaluer la qualité d’une selle d’un point de vue ergonomique, et comment améliorer les éventuels points qui lui feraient défaut.

2) Selle mal adaptée : quelles conséquences ?

a) La pression comme principale ennemie du sellier

La première conséquence d’une mauvaise adaptation de la selle sera une pression localisée ou mal répartie de la selle sur le dos. La pression est définie comme la force exercée

par unité de surface : $P = F / S$; exprimée en N/m^2 , en Pa, ou en mmHg. Ainsi, si F augmente (par exemple, lorsqu'un cavalier est en selle), la pression P augmentera elle aussi. Inversement, lorsque la surface S diminue, la pression P augmentera (dans le cas de points de pression localisés par exemple).

Si les pressions sont mal réparties, les conséquences délétères seront donc plus importantes avec un cavalier lourd et des surfaces de contact petites. Donc pour diminuer la pression exercée par la selle, nous pourrions diminuer le poids du cavalier (peu réalisable en pratique), ou jouer sur la surface de contact qui devra être la plus grande et homogène possible, en évitant au maximum les points de pression isolés. La pression exercée par la selle sur les structures anatomiques du cheval aura de nombreuses conséquences, détaillées dans les paragraphes suivants, et toutes délétères pour la santé du cheval. Il est donc primordial d'éviter au maximum les excès de pression sous le harnachement, et cela passe par une bonne répartition de cette dernière, donc par une bonne adéquation de la selle.

Notons que si le cheval n'est généralement pas sellé pendant des temps très long, la pression peut en théorie entraîner des dommages aux tissus mous sur de courtes durées. Les études à ce sujet annoncent des délais de 1h à 12h avant d'observer des lésions secondaires à la pression (Kosiak, 1959). Avec des séances d'entraînement quotidiennes durant classiquement entre 30min et 1h30, nous pourrions donc facilement observer des lésions avec la selle.

b) Première conséquence d'une pression excessive : la douleur

Des études se sont intéressées aux seuils de pression acceptables par les tissus vitalisés. En effet, on sait que la pression induit une ischémie tissulaire. La littérature reste controversée sur la valeur de pression à partir de laquelle il y a occlusion des capillaires, mais cette dernière semble se situer autour de 35 mmHg (pression intraluminale des capillaires, à dépasser pour les écraser). Cette valeur fut initialement proposée par Landis (1930), et reste aujourd'hui la plus communément admise (Thompson, 2005). Or selon Brouard (2000), l'ischémie tissulaire induite par une pression trop élevée est source de douleur, en abaissant le seuil d'excitabilité des nocicepteurs vis à vis de l'acide lactique, lui-même accumulé dans le muscle mal irrigué. La pression induite par une selle mal adaptée entraînera donc directement un inconfort, dû à l'ischémie tissulaire, pouvant aller jusqu'à une douleur prononcée.

c) Baisse de performance et gêne locomotrice

La pression excessive de la selle inadaptée peut ainsi entraîner une douleur dorsale importante. Malgré cette dernière, les signes d'inadéquation de la selle restent frustes. Les propriétaires décrivent des changements de comportements ou une boiterie discrète, et si ces dorsalgies sont un problème fréquent en clientèle, leur diagnostic s'avère souvent compliqué pour le clinicien. Avant de montrer des signes physiques (poils cassés, dérèglement de la sudation ...), les chevaux montreront souvent des signes comportementaux.

En main, le cheval qui souffre de dorsalgies a déjà un comportement modifié. Il a l'air abattu, et peut avoir des difficultés pour se coucher ou pour uriner. Lors du pansage, le cheval peut creuser le dos lors du passage de la brosse, être réticent, et coucher les oreilles en arrière.

La même attitude peut être observée lorsque le cheval est sellé, ou sanglé, pouvant aller, pour les chevaux très douloureux, jusqu'aux ruades lors du sanglage. Il est légitime de penser que le cheval, qui associe la sensation douloureuse à la selle, redoute le moment où il va être sellé.

En selle, le cheval qui souffre d'une selle mal adaptée sera tout d'abord « contre performant ». Cette baisse de performance pousse souvent le cavalier à consulter le vétérinaire. L'amplitude peut être diminuée, avec un cheval « étriqué » ayant des allures moins déliées et engageant moins ses postérieurs sous la masse. Cela s'observe souvent lors d'une selle placée trop en avant et comprimant les épaules. Le cheval peut également prendre plus de temps avant d'être correctement échauffé. Il peut se braquer lors des sollicitations du cavalier, ou lors de la présentation devant un obstacle. Il peut également présenter des difficultés pour s'incurver correctement. Dans les cas extrêmes, le cheval peut se montrer agressif, et se cabrer ou ruer lorsqu'il est sollicité de façon trop importante.

d) Signes physiques

Enfin, la selle mal adaptée peut entraîner des lésions macroscopiquement visibles sur le tégument du cheval. Ces lésions seront douloureuses pour la plupart, mais comme nous l'avons vu précédemment, elles ne conditionnent pas l'apparition de la douleur et des baisses de performances. Plusieurs signes physiques peuvent être observés sur le dos du cheval lorsque la selle est inadaptée, détaillés ci-après.

i) Poils cassés

Les frottements, ou cisaillements, sont des forces de pression appliquées parallèlement à la surface de contact avec le tissu (Krouskop, 1983). Ces forces de cisaillement apparaissent lorsque la selle bouge durant le déplacement du cheval. Associées à la gravité et au poids du cavalier, elles contribuent à l'apparition de lésions cutanées et sous cutanées. Les parois des cellules endothéliales sont endommagées, amenant progressivement à une mort cellulaire et à une nécrose des tissus. Dinsdale, en 1974, utilise des porcs pour démontrer que la présence de forces de cisaillement diminue fortement (de 290 mmHg à 45 mmHg) la pression nécessaire pour observer la formation d'un ulcère.

L'observation de poils abîmés, cassés, ou de régions dépilées sous la selle peut alerter le clinicien sur les frottements de la selle. Il faudra observer toute la zone du dos du cheval en regard avec la selle.

ii) Perturbation de la sudation

Le deuxième signe physique que l'on peut observer lorsque la pression est répartie de façon non homogène sous la selle est une transpiration irrégulière. Des plages de poils secs seront notées après l'effort sous les zones de pression élevée. Cette dernière empêche le bon

fonctionnement des glandes sudoripares, profondément insérées dans le réseau de capillaires sanguins.

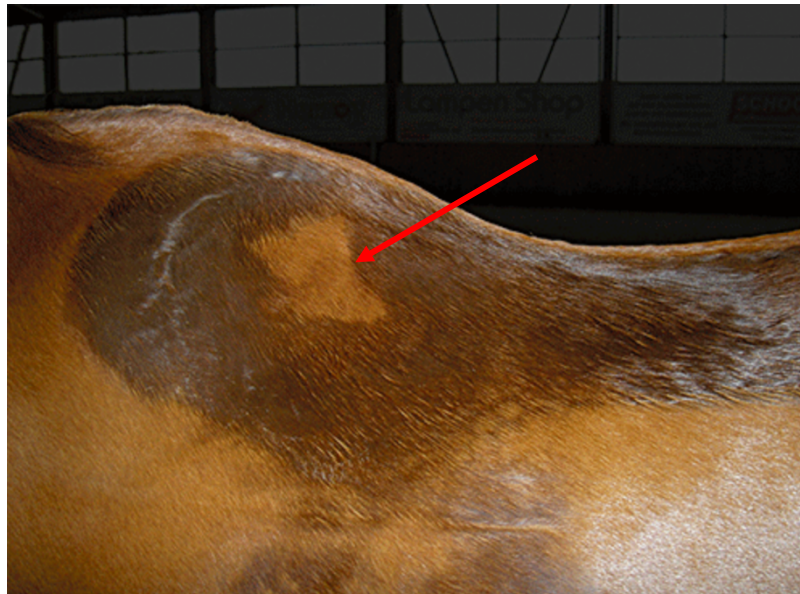


Figure 16 : Cheval présentant une zone sèche après un travail intense (d'après Von Peinen et al., 2010)

Dans une étude rétrospective publiée en 2010, Von Peinen compare des chevaux avec des selles plus ou moins adaptées, et montre que les chevaux subissant les pressions les plus faibles (selles adaptées) sont ceux pour lesquels il n'y avait pas de perturbation de la sudation. Les zones de non-sudation permettraient donc de détecter une mauvaise adaptation de la selle.

iii) Gonflement des tissus mous

Chez certains chevaux, directement après l'effort, il est possible d'observer une tuméfaction indolore au niveau des points de pression élevés. Il s'agit d'un œdème traumatique des tissus mous, la circulation lymphatique ayant été perturbée. Cela peut donc permettre de repérer une inadéquation de la selle, même si ce gonflement disparaît rapidement après le retrait de la selle.

iv) Blanchissement des poils

Une décoloration du poil est fréquemment observée chez les chevaux montés, au niveau du garrot essentiellement. Elle est le signe d'une lésion permanente du follicule pileux, due à

une pression trop élevée exercée par la selle. Les poils deviennent blancs et ne retrouveront pas leur couleur d'origine.

3) Évaluation de l'adaptation de la selle au dos du cheval

Pour éviter toutes les conséquences d'une selle mal adaptée que nous avons citées précédemment, il apparaît essentiel d'étudier l'adaptation de la selle avant son utilisation. Dans cette optique, différents points doivent être respectés, et de nombreux outils sont à notre disposition pour évaluer correctement l'adéquation de la selle.

a) Points clés à observer

i) Examen de la selle isolée

Dans un premier temps à lieu l'examen isolé de la selle. La première chose à regarder est l'intégrité de la selle, son état général et l'entretien. En effet, une selle cassée, ou très abîmée pourra gêner un cheval pour lequel elle était initialement bien adaptée. On observe ensuite si l'arçon est intègre. Une façon de faire est d'attraper le pommeau de la selle d'une main, le trousséquin de l'autre, de placer notre tibia au milieu du siège, et de tirer la selle vers nous. Si en forçant contre la selle avec notre tibia, on sent des craquements ou une souplesse exagérée, c'est que la selle est probablement cassée. On peut ensuite placer la selle entre nos adducteurs (le siège vers le haut, chaque quartier au contact d'une jambe) et serrer les jambes : si en serrant, il n'y a pas de résistance, la selle est probablement cassée.

Une fois l'intégrité et le bon état de la selle vérifiés, il convient de juger de sa symétrie : la selle est-elle tordue ? Pour cela, on regarde dans l'axe trousséquin-pommeau, afin de juger du bon alignement des différents composants. On veillera cependant à ne pas prendre les coutures comme repère, puisque les selliers étant tous gaucher ou droitier, un côté sera toujours plus serré que l'autre.

On observe enfin les matelassures. La gouttière (sous la selle) doit pouvoir laisser passer trois doigts facilement (environ 5 cm). Si ce n'est pas le cas, elle est trop étroite et gênera le cheval. Elle doit aussi être centrée sur la selle. Les matelassures délimitant cette gouttière doivent amortir correctement, sans pour autant s'écraser sous la pression du cavalier (Eugénie Cottreau, communication personnelle).

Si la selle présente un bon état et répond à tous ces critères, on peut la poser sur le dos du cheval et procéder à un examen statique de la selle en place.

ii) Examen statique de la selle sur le dos du cheval

Il est souvent intéressant de demander au cavalier de positionner la selle sur le dos de son cheval car cela nous permet de voir comment est sellé le cheval quotidiennement. De nombreux cavaliers ont tendance à poser la selle trop en avant, surtout parmi les cavaliers de

saut d'obstacle. Une selle placée trop cranialement gênera les mouvements de la scapula et de l'épaule. D'autres critères doivent être respectés pour qu'une selle soit correctement adaptée à un cheval :

- Le centre du siège doit se trouver au-dessus de T13, et la selle ne doit pas dépasser T17 caudalement.
- Elle doit poser de façon homogène sur toute la surface portante. Il faut regarder de près, et ne pas hésiter à passer sa main le long des matelassures sous le siège pour vérifier qu'il n'y ait pas une région sans appui. Il faut « palper » le plus possible, pour détecter des zones de pression exagérées ou de vide. Il faut faire particulièrement attention à la pointe de l'arçon, qui peut facilement exercer une pression importante et gêner l'amplitude de mouvement du cheval.
- L'équilibre de la selle posée sur le dos doit être horizontal à légèrement descendant cranio-caudalement.
- L'espace entre le garrot et l'arçon doit laisser passer environ trois doigts. Ce critère est extrêmement important à respecter, pour ne pas avoir d'appui sur le garrot lors du mouvement. Un cheval blessé au garrot ne pourra plus être monté avant complète cicatrisation.
- La sangle doit tomber en face du passage de sangle, et ne pas tirer les contres sanglons vers l'avant ou vers l'arrière lorsque le cheval est sanglé.
- Les étriers, eux, doivent tomber au milieu du panneau.
- La taille du siège doit être adaptée à la taille du cavalier. Une selle bien adaptée mais trop grande pour le cavalier le fera bouger de façon exagérée par exemple.

Cet examen statique est important pour juger une selle, mais il devra toujours être suivi d'un examen en mouvement. La finalité d'une selle est effectivement bien d'être utilisée en mouvement, et non posée sur un cheval immobile !

iii) Examen dynamique de la selle sur le dos du cheval

L'examen dynamique est indispensable pour juger de la bonne adaptation d'une selle, même si nous ne disposons pas d'outil pour étudier objectivement la selle, tels que ceux décrits dans le paragraphe suivant. En effet, le poids, et la position du cavalier auront souvent un effet non négligeable. On observe donc le cheval monté en mouvement, et on s'intéresse aux points suivants :

- Est-ce que la selle bouge d'avant en arrière lors du déplacement ?
- Est-ce que le siège se lève (i.e. se « décolle » caudalement, n'est plus en contact avec le dos) lors du mouvement ?
- Le cheval montre-t-il des signes d'inconfort ou de douleur ? Ses allures sont-elles identiques avec et sans le cavalier sur le dos ?
- L'amplitude de foulée est-elle conservée ?
- Le cavalier est-il stable, avec des jambes fixes, ou bouge-t-il exagérément ?

Cette évaluation complète de la selle (en statique puis en dynamique) permet d'apprécier au mieux son adaptation pour un couple cavalier-cheval donné. Et récemment, des outils sont

apparus sur le marché, permettant d'évaluer objectivement certains paramètres d'adaptation de la selle.

b) Les outils à disposition du vétérinaire pour juger de la bonne adaptation de la selle

Depuis plusieurs années, des outils sont apparus permettant une évaluation objective de certains paramètres de l'adaptation de la selle au dos du cheval. Ces derniers sont utilisés pour des études sur la locomotion du cheval sellé, ou pour l'aide à l'évaluation de l'adéquation de la selle.

Le premier, utilisé depuis des années déjà par les selliers pour prendre des mesures de la topographie du dos des chevaux à seller, est très simple : une tige suffisamment flexible pour pouvoir se mouler sur le dos du cheval, et suffisamment rigide pour garder sa forme et la reporter sur un papier (figure 17). Elle se place sur le dos du cheval, avec les bras perpendiculaires au sol. Ils sont ensuite moulés de chaque côté de la colonne vertébrale, le long des masses musculaires du cheval. Cette opération peut être répétées le long du dos du cheval, entre le garrot et T17, ce qui permet de retracer la forme du dos du cheval sur le papier.



Figure 17 : Utilisation d'une courbe flexible par un sellier. (Source : Saddle Fitting)

Ce même principe a été repris plus récemment (2012) avec l'outil Equiscan® qui, une fois positionné sur le dos, permet une prise de topographie de ce dernier (figure 18) et transmet les données à un logiciel spécifique qui les traite. On peut alors visualiser le dos en 3D grâce à la centaine de points enregistrés. Cet outil « scanne » le dos du cheval pour avoir des informations sur sa topographie précise. Notons que cela ne constitue qu'une évaluation du dos en statique. Il faudra donc compléter l'étude du dos par une observation du cheval en mouvement.



Figure 18 : Equiscan® positionné sur le dos d'un cheval. (Source : Equiscan)

Un second outil que l'on peut retrouver sur le marché et qui reste très simple d'utilisation est le tapis à mémoire de forme. C'est un tapis rempli de gel, qui garde la forme de la selle « imprimée » après utilisation. On peut donc avoir une idée (assez imprécise) de l'adéquation de la selle au dos du cheval en observant les zones de pression.

Enfin, arrivés plus récemment sur le marché et plus techniques à utiliser, on retrouve les tapis capteurs de pression et la thermographie. Le premier est un outil de mesure des pressions à l'interface entre la peau du cheval et la selle. Constitué d'une multitude de capteurs de pression contenus dans une enveloppe, il enregistre les pressions subies au cours du temps. Si ces tapis restent fragiles et techniques à utiliser, ils donnent des informations très précieuses concernant les pressions subies par le dos du cheval lors de l'exercice.

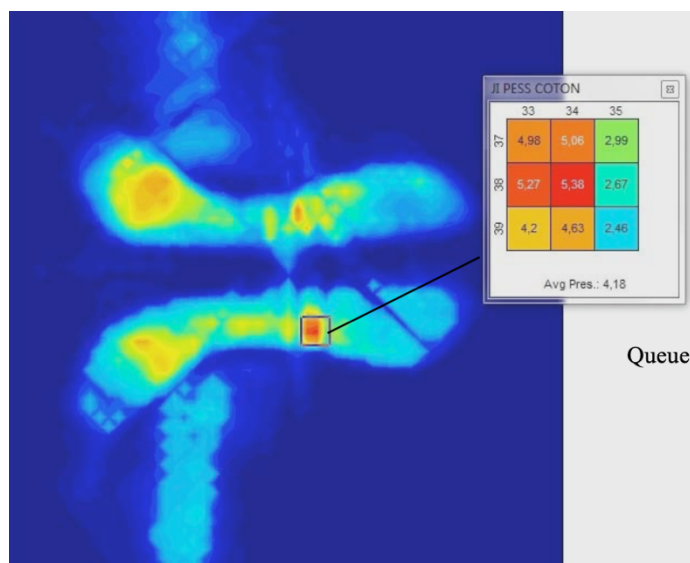


Figure 19 : Image issue de l'utilisation d'un tapis capteur de pression chez un cheval monté. Les zones bleues représentent les pressions faibles, tandis que les zones rouges représentent les pressions élevées. (Bonati, 2011)

Le second, la thermographie, correspond à la détection du motif thermique de la structure étudiée à l'aide d'une caméra thermique. Ces caméras captent la chaleur dissipée, et traduisent à l'aide d'un code couleur la température de cette dernière (allant du bleu, le plus froid, au rouge, le plus chaud). On sait que la chaleur d'un tissu biologique provient de son métabolisme et du flux sanguin qui le traverse. Le tissu cutané ne participant pas à l'activité physique, on peut considérer son métabolisme comme étant quasi nul. Il est donc admis que toute variation de température du tissu cutané est consécutive à des changements de la perfusion sanguine par les vaisseaux cutanés (Turner (2009), rapporté par Bonati (2011)). C'est donc le flux sanguin qui détermine le motif thermique. En connaissant le motif thermique cliniquement normal du cheval (symétrique, sans augmentation excessive de la température le long de la colonne), on peut localiser des zones lésionnelles facilement. Une augmentation ou une diminution de 1°C est significativement corrélée à une zone lésionnelle. Les caméras thermiques sont pointées soit sur le dos du cheval, soit sur l'intérieur de la selle, directement après le travail pour étudier leurs motifs thermiques.

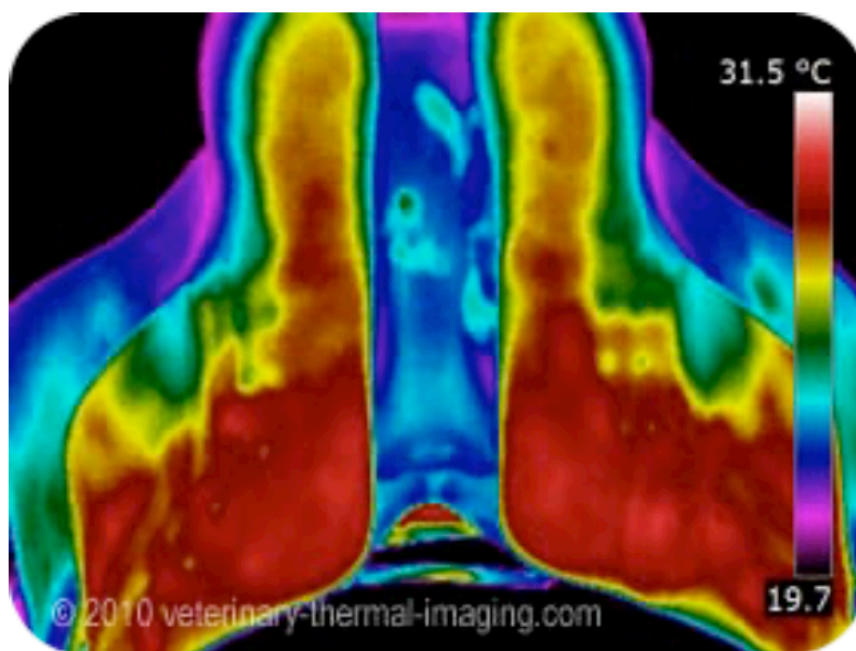


Figure 20 : Motif thermique d'une selle observée directement après l'effort. Ici, la chaleur n'est pas répartie de façon homogène sur les panneaux et les quartiers, ce qui signe une selle mal adaptée au dos du cheval en question. (Veterinary Thermal Imaging)

Tous ces outils sont différents, mais ils permettent tous d'avoir des données objectives sur la selle et son adaptation au dos du cheval. Il faudra cependant garder à l'esprit que le dos est une structure biologique pouvant évoluer avec le travail ou l'âge du cheval. Il faut donc rester vigilant quant à l'adaptation de la selle au cours du temps.

4) Les selles modernes : une adaptabilité de plus en plus importante

Les selles fabriquées aujourd'hui ont bien évolué sur le plan de l'adaptabilité. Certains composants peuvent être ajustés en fonction du cheval utilisé, et lorsque la selle ne convient pas, de nombreux pads et amortisseurs existent sur le marché pour corriger ses défauts. Il n'est donc pas rare aujourd'hui de voir des cavaliers monter plusieurs chevaux aux conformations bien différentes avec une seule et même selle. Le gain économique de ce genre d'opération est considérable.

Grâce aux outils cités dans la partie précédente, il est aussi possible de réaliser des selles sur mesure. Les selliers réalisent une carte topographique du dos du cheval en amont, et s'en servent pour fabriquer une selle parfaitement adaptée au dos du cheval. Ces selles sont, en théorie, les moins traumatiques pour les chevaux, mais sont également les plus onéreuses.

Il existe ensuite, sans forcément fabriquer une selle entière sur mesure, des selles dont certains composants sont ajustables. Et ce, à prix tout à fait abordable aujourd'hui. On trouve, par exemple des selles dont l'arçon est ajustable (plus ou moins ouvert selon le cheval monté), ou dont les couteaux d'étrivières sont réglables (figure 13). On trouve également des selles dont la forme générale peut être adaptée à différentes morphologies : les selles Bua, Evolutionary, ou Reactor Panel en sont des exemples.



Vue de face



Vue de derrière

Figure 21 : Exemple d'une selle ajustable de la marque Evolutionary Saddles. Les matelassures s'adaptent selon la morphologie du dos auquel elles doivent répondre. (Source : Evolutionary Saddle)

Enfin, lorsque la selle présente des défauts ou n'est pas optimale pour le cheval devant être sellé, il est possible d'améliorer l'adéquation de la selle à l'aide d'amortisseurs ou de pads positionnés entre le tapis et la selle. C'est la pratique la plus répandue, et la plus économique. Il est possible de corriger l'équilibre de la selle, d'améliorer l'amorti en absorbant les chocs, ou de supprimer des points de pression. De très nombreux amortisseurs existent aujourd'hui, et diffèrent tant dans la forme que dans le matériau utilisé. De nombreuses études se sont intéressées à leur effets et efficacités (Bonati (2011), Kotschwar *et al.*, (2010), MacKechnie *et al.*, (2011)), mais l'utilisation de ces amortisseurs est encore trop souvent régie par des effets de modes, et non par des considérations scientifiques et spécifiques à chaque cheval. Quelques exemples (non exhaustifs) d'amortisseurs qui peuvent nous aider à corriger une selle sont donnés dans les figures 22 à 24 :



Figure 22 : Pad de garrot, utilisé pour surélever une selle comprimant le garrot. (Photo J. Urlacher)

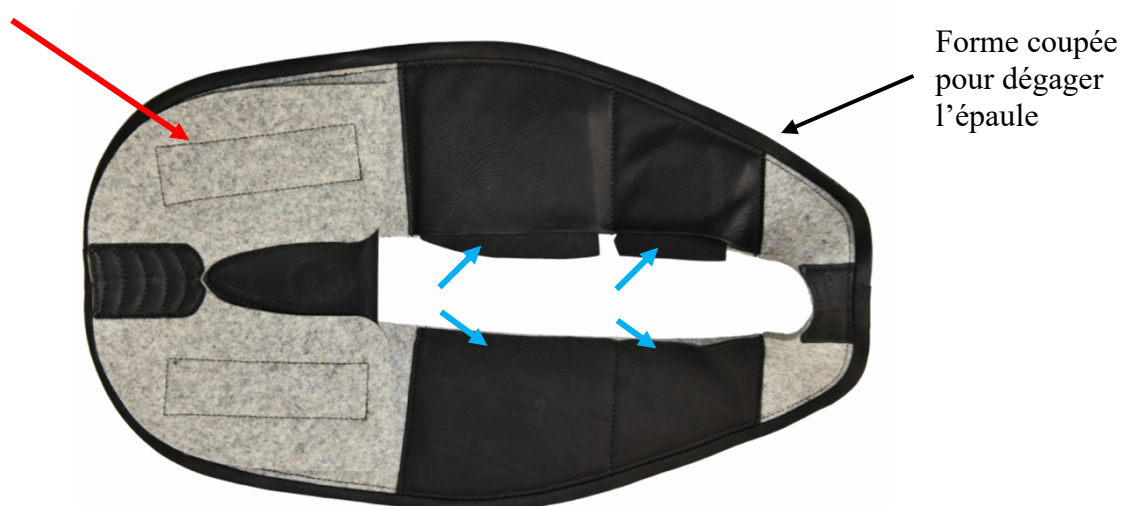


Figure 23 : Amortisseur « interface », de la sellerie Maurel. Cet amortisseur est coupé de façon à dégager les épaules et s'adaptera donc bien aux chevaux possédant une épaule forte. Il est possible de glisser des cales (flèches bleues) et de positionner ou non une cale en feutre (flèche rouge) à l'arrière de la selle pour corriger l'équilibre et améliorer l'adaptation de la selle. (Source : Maurel)



Figure 24 : Amortisseur à mémoire de forme, permettant de limiter les points de pression localisés et de corriger les défauts de la selle. (Photo J. Urlacher)

Le *saddle fitting* peut donc prendre différents aspects, de la conception de la selle, à son ajustement, jusqu'à sa correction par des pads ou amortisseurs. La finalité reste toujours la même : améliorer au maximum le confort du cheval et de son cavalier, en vue d'optimiser leurs performances sportives. À travers notre étude expérimentale, nous avons essayé de simuler une selle mal adaptée au dos du cheval, soit en modifiant l'équilibre de la selle, et donc celui du cavalier (ce qui a de nombreuses conséquences sur la répartition des pressions), soit en augmentant les pressions de façon localisées sur certaines zones du dos du cheval. Nous étudions ensuite la locomotion du cheval avec des capteurs de locomotion, et caractérisons les éventuelles modifications dans sa locomotion.

Partie II :

Étude expérimentale : *évaluation de l'effet d'un* *déséquilibre exagéré de la* *selle sur la locomotion du* *cheval*

I) Objectif de l'étude

Comme nous avons pu le voir dans notre première partie, la selle est loin d'être sans effet sur la locomotion du cheval. Nous avons donc souhaité, avec ce travail, simuler une selle mal adaptée au dos du cheval, et étudier la locomotion du cheval monté afin d'évaluer si des modifications de locomotion étaient induites par cette selle inadaptée et les changements consécutifs de la position du cavalier.

La mauvaise adaptation de la selle est réalisée en associant une selle ajustée (pour un cheval donné), avec un tapis possédant des cales en feutre. En fonction de la combinaison de cales choisie sur le tapis, l'équilibre et les pressions de la selle sont modifiés. Des acquisitions avec plusieurs capteurs de locomotion différents sont ensuite réalisées avec le cheval en mouvement sous la selle du cavalier. Nous souhaitons alors évaluer les modifications potentiellement induites par une mauvaise adaptation de la selle sur la locomotion du cheval.

L'hypothèse principale est qu'un déséquilibre de la selle, ou des pressions irrégulières modifient la locomotion du cheval. En effet, de nombreux chevaux présentent des réactions de défense lorsqu'ils sont travaillés avec des équipements inadaptés, sont raides, avec des allures étriquées, ou même parfois boiteux. Une pression excessive au niveau du garrot et des épaules semblerait affecter la locomotion du cheval de façon plus importante qu'une pression excessive en région thoraco-lombaire. Nous nous efforcerons donc de caractériser le plus précisément possible l'influence de l'équipement sur la locomotion du cheval si un lien de causalité venait à être mis en évidence à l'issue de nos mesures.

II) Matériel et méthode

Le protocole de l'étude a été agréé par le comité d'éthique de VetagroSup et enregistré sous le n°2090 (annexe 1).

A) Population d'étude

L'objectif de l'étude étant d'étudier l'impact de la selle sur la locomotion des chevaux de sport essentiellement, la population d'étude choisie est constituée de chevaux évoluant en saut d'obstacle (CSO) dans la région Rhône-Alpes, et étant actuellement au travail.

1) Critères d'inclusion

Les critères d'inclusions des animaux dans l'étude ont été les suivants :

- Le cheval évolue en CSO et est actuellement au travail
- Le cheval est âgé de 7 à 18 ans
- Le cheval ne présente pas d'anomalie locomotrice à l'examen (boiterie, dorsalgie, défaut d'aplomb majeur ...)
- Le cheval n'a pas participé à une compétition sportive dans les cinq jours précédant les mesures

2) Critères de non-inclusion

Tous les chevaux ne répondant pas aux critères d'inclusions ne pourront être admis dans l'étude. À cela s'ajoute les chevaux pour lesquels le propriétaire refuse la participation à l'étude.

3) Écuries, infrastructures à disposition, et cavalier de l'étude

Deux protocoles d'étude ont été mis en place pour réaliser les mesures de notre thèse. Ils utilisent tous les deux le même matériel, et seront détaillés dans les paragraphes suivants.

a) Première expérimentation

Les chevaux recrutés sont tous montés par le cavalier professionnel Axel Delord, qui les travaillent habituellement. Un cavalier expérimenté a en effet une influence moindre sur la locomotion du cheval (Peham *et al.*, 2004). De plus, une relation linéaire existe entre le poids du cavalier et les pressions exercées par la selle (Jeffcott, Holmes and Townsend, 1999) (de Cocq, van Weeren and Back, 2006). Le même cavalier a donc monté tous les chevaux de l'étude pour s'assurer que les résultats puissent être comparés.

Les mesures étaient réalisées sur une carrière en Toubin-Clément, de 70m par 35m. Tous les chevaux étaient montés avec le même équipement sur la même carrière.

Le consentement oral des propriétaires des chevaux inclus dans l'étude a été recueilli avant le début des mesures. Ainsi, nous avons pu recruter au total neuf chevaux répondants aux critères d'inclusion dans l'étude, pour ce premier protocole.

Le tableau suivant récapitule les chevaux participants à l'étude :

Cheval	Age	Niveau d'épreuve
Vicky	13 ans	125 cm
Harry	11 ans	145 cm
Éclipse	8 ans	125 cm
Rouet	17 ans	125 cm
Sapho	16 ans	110 cm

Daisy	14 ans	115 cm
Prince	18 ans	125 cm
Flora	7 ans	110 cm
Kiss Me	8 ans	130 cm

b) Deuxième expérimentation

Les chevaux recrutés pour l'expérimentation n°2 sont tous montés par la même cavalière, Myriam Rambaud-Méasson, qui les travaille régulièrement. C'est une cavalière expérimentée, évoluant en compétition au niveau Pro 2. Les mesures étaient réalisées sur une carrière en Toubin-Clément, de 50m par 25m, et tous les chevaux étaient montés avec le même équipement sur la même carrière.

Le consentement oral des propriétaires des chevaux inclus dans l'étude a été recueilli avant le début des mesures. Ainsi, nous avons pu recruter au total cinq chevaux répondants aux critères d'inclusion pour ce second protocole.

Le tableau suivant récapitule les chevaux participants à l'étude :

Cheval	Age	Niveau d'épreuve
Colorado	10 ans	105 cm
Decibel	9 ans	110 cm
Dedicace	9 ans	100 cm
Excell	8 ans	110 cm
Prince_2	18 ans	120 cm

B) Matériel

1) Tapis utilisé pour les études

Dans la réalisation de chacun des deux protocoles, nous avons choisi de réaliser les mesures avec une seule et même selle, connue pour être adaptée à tous les chevaux de l'étude,

et en faisant varier son équilibre à l'aide de cales en feutre. Le facteur variant est ainsi l'équilibre longitudinal du cavalier sur la selle, ainsi que la répartition des pressions de la selle. Le principe est donc d'utiliser un tapis sous la selle permettant de modifier son équilibre. Le Dr BAUP, qui est à l'initiative de cette étude, a créé ce tapis en collaboration avec la sellerie Maurel, et nous l'a donc gracieusement mis à disposition pour nos mesures.



Figure 25 : Tapis utilisé pour les mesures (Photo B. Baup)

Le tapis utilisé est celui de la figure 25. Le support pour les cales est en cuir souple de 5 mm d'épaisseur, et est coupé de façon ergonomique pour épouser la forme du dos du cheval sous la selle. Les cales de 1 cm s'y ajustent avec un système de velcro, sur deux épaisseurs. On trouve donc, de chaque côté du tapis, deux cales à l'arrière, deux cales au milieu, et deux à l'avant. Ceci permet de modifier l'équilibre de la selle comme observé sur les figures 26 à 28.



Figure 26 : Cheval sellé avec le tapis de l'étude, et aucune cale en feutre. (Photo J. Urlacher)

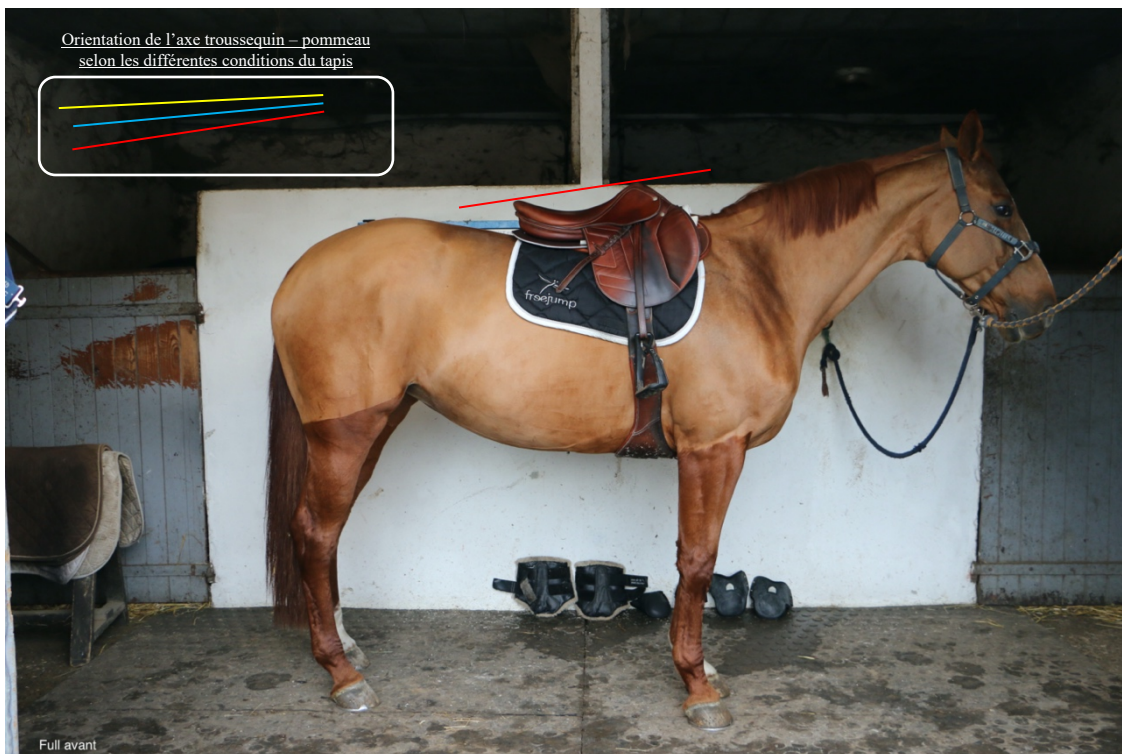


Figure 27 : Cheval sellé avec le tapis de l'étude, et les deux cales avant en feutre. (Photo J. Urlacher)



Figure 28 : Cheval sellé avec le tapis de l'étude, et les deux cales arrière en feutre. (Photo J. Urlacher)

Afin de mieux visualiser les modifications d'équilibres induites par le tapis, des traits de couleurs ont été tracés (reliant le sommet du pommeau et le sommet du troussequin) sur les figures 26 à 28 suivant le code couleur suivant :

Bleu = équilibre de la selle sans cales (uniquement le tapis en cuir).

Rouge = équilibre de la selle avec les deux cales avant.

Jaune = équilibre de la selle avec les deux cales arrière.

2) Analyse de la locomotion au moyen du système Lameness Locator Equinosis

a) Fonctionnement du système et utilisation

i) Principes généraux

Le Lameness Locator® est un système de capteurs inertiels fabriqué par la société Equinosis LLC, visant à détecter des boiteries chez le cheval. Il est constitué de deux accéléromètres (positionnés sur la nuque, et sur le pelvis, mesurant l'accélération verticale) et d'un gyroscope (fixé sur la face dorsale de l'antérieur droit, permettant de définir les foulées). Ces trois capteurs transmettent les données à une tablette qui les analyse en temps réel, et affiche les résultats directement dans le logiciel Lameness Locator®.

L'algorithme du logiciel reçoit les valeurs des différents capteurs, sélectionne les plages de données interprétables, et les analyse en calculant le rapport de l'accélération verticale due à la boiterie sur l'accélération verticale naturelle. Le Lameness Locator permet donc de détecter des irrégularités d'allure, en associant l'accélération verticale de la tête ou du bassin à la vitesse angulaire de l'antérieur droit afin de déterminer quel membre et quelle phase de la foulée sont concernés par l'irrégularité (phase de propulsion ou phase de réception).

Sa facilité d'utilisation, sa sensibilité ainsi que sa répétabilité en font un capteur de locomotion de choix pour les études expérimentales. Nous avons donc choisi de travailler avec ce capteur.

ii) Les capteurs

Les trois capteurs du système Lameness Locator® sont différents. Une flèche dessinée sur les capteurs en indique le sens lors du positionnement et ce dernier doit être respecté pour que les résultats soient fiables.

Le premier est un gyroscope et est positionné sur la face dorsale du paturon de l'antérieur droit (figure 29). Il ne doit pas tourner durant l'examen. Il sert à définir les foulées. En connaissant la vitesse angulaire de l'antérieur droit, on peut en déduire le temps d'appui et de soutien de ce membre, et donc la position des autres membres. On sait ainsi quel membre est à l'appui ou au soutien à n'importe quel moment de l'examen locomoteur.



Figure 29 : Gyroscope dans son étui, placé sur la face dorsale du paturon du membre antérieur droit. (Photo J. Urlacher)

Le second capteur est placé, à l'aide d'un bonnet spécial (figure 30), en avant de la nuque du cheval, entre les deux oreilles. Il doit bien être positionné au milieu de la tête du cheval, et orienté dans l'axe sagittal. C'est un accéléromètre mesurant l'accélération verticale de la tête, qui en déduit les hauteurs maximales et minimales atteintes par la tête du cheval.



Figure 30 : Accéléromètres positionnés dans leurs étuis, sur la tête du cheval (à gauche) et sur le pelvis du cheval (à droite). (Photos J. Urlacher)

Le troisième et dernier capteur (figure 30) est placé sur le pelvis du cheval (dans l'axe sagittal du cheval, au point le plus haut du bassin), à l'aide de velcros. Il mesure lui aussi l'accélération verticale du pelvis et en déduit les hauteurs maximales et minimales atteintes par le bassin du cheval sur l'ensemble des foulées.

a) Méthode d'analyse

i) Analyse du mouvement de la tête du cheval et paramètres utilisés

Lorsque le cheval se déplace au trot, son encolure décrit un mouvement périodique de balancier, descendant la tête lors de la réception sur un diagonal et du début de la phase d'appui, puis la relevant pour prendre son impulsion et sauter avant de changer de diagonal. Cela est visible sur la figure 31 ci-dessous : la courbe rouge représente le mouvement vertical de la tête d'un cheval sain, atteignant un minimum lors du milieu de la phase d'appui, et atteignant un maximum lors du milieu de la phase de soutien. Ce balancier s'apparente donc à une sinusoïde, caractérisée par une fréquence et une amplitude propre.

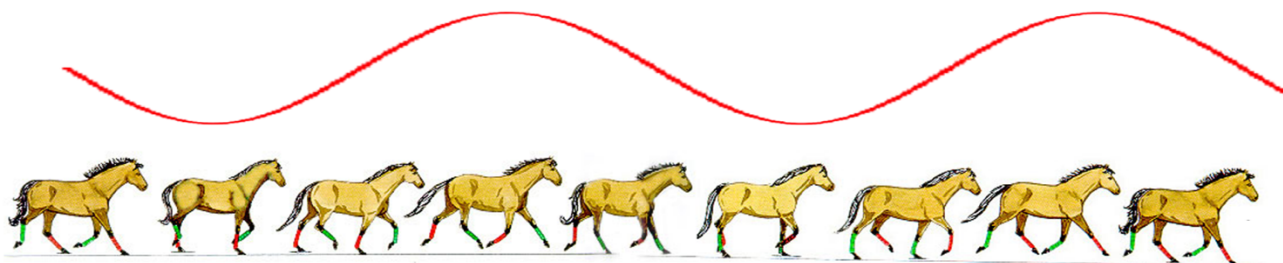


Figure 31 : Mouvement de la tête du cheval sain lors de déplacement au trot (d'après les manuels officiels de préparation aux brevets fédéraux)

Lorsqu'un cheval souffre d'un membre, il aura tendance à mettre moins de poids lors de l'appui sur ce membre, en reportant le poids sur le membre controlatéral lors de la foulée suivante. Ceci se traduit par un mouvement vertical du balancier tête-encolure ne suivant plus une sinusoïde, mais décrivant plutôt un tracé comme observé sur les figures 32 et 33.

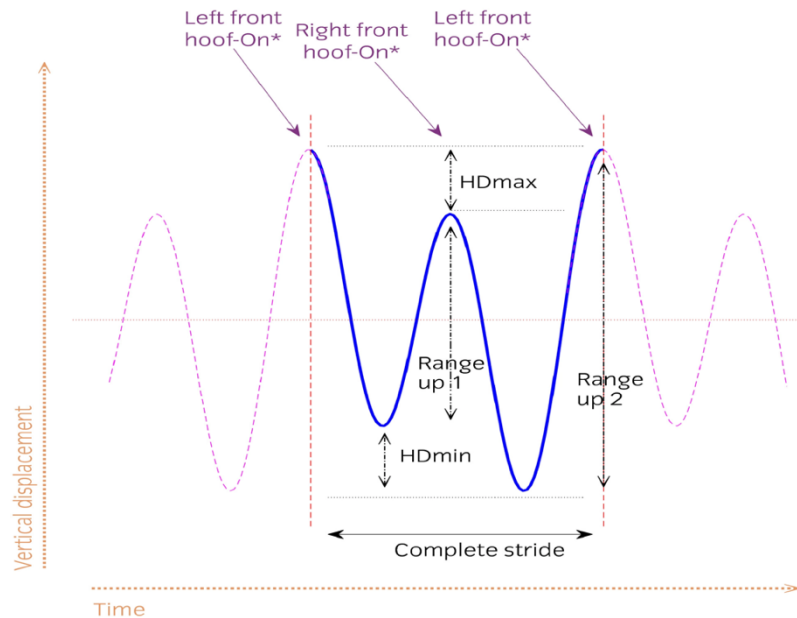


Figure 32 : Exemple du mouvement vertical de la tête chez un cheval boitant de l'antérieur gauche (d'après Rhodin et al., 2018)

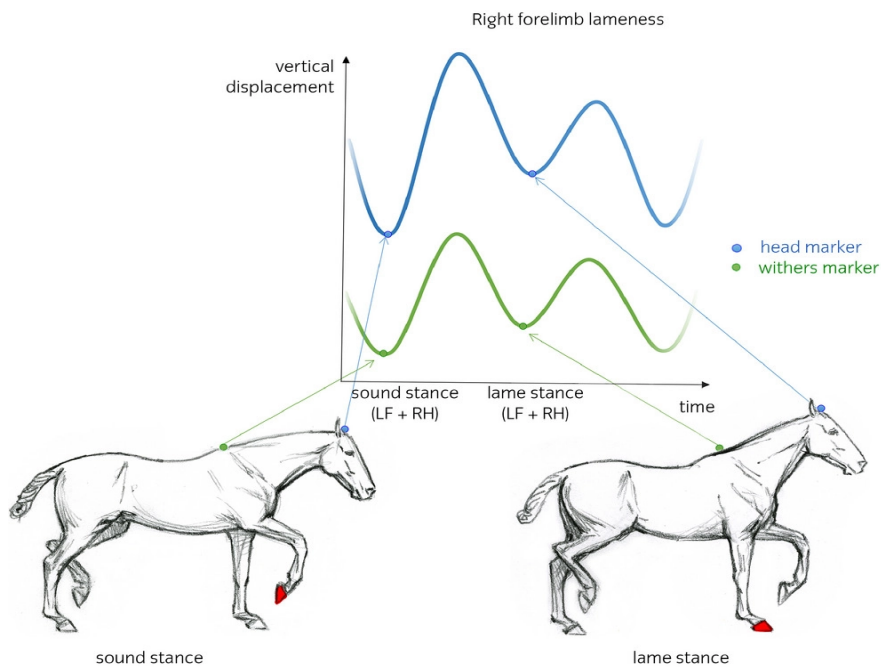


Figure 33 : Exemple du mouvement vertical de la tête chez un cheval boitant de l'antérieur droit (d'après Rhodin et al., 2018)

En effet, nous avons un mouvement asymétrique dû à la boiterie, pour lequel plusieurs cas de figure sont possibles : si le cheval souffre lors du poser du membre entre le début et le milieu de la phase d'appui, il aura tendance à limiter au maximum la pression exercée sur ce membre lors de l'appui, et redressera la tête lors de la réception sur ce membre. On observera ainsi une élévation de la tête lors de l'appui sur le membre boiteux. Si le cheval souffre plutôt lors la phase d'impulsion (ie entre la moitié de la phase d'appui et la phase de soutien), alors il aura tendance à lever la tête plus haut lors de la fin de la phase d'appui (cf figure 33).

Ainsi, en nous intéressant à certains paramètres particuliers donnés par le capteur, nous pouvons quantifier la boiterie d'un cheval, et déterminer si cette boiterie est plutôt une boiterie d'impact (lorsque le pied arrive au sol) ou une boiterie d'impulsion (lorsque le pied quitte le sol pour rentrer dans la phase de soutien).

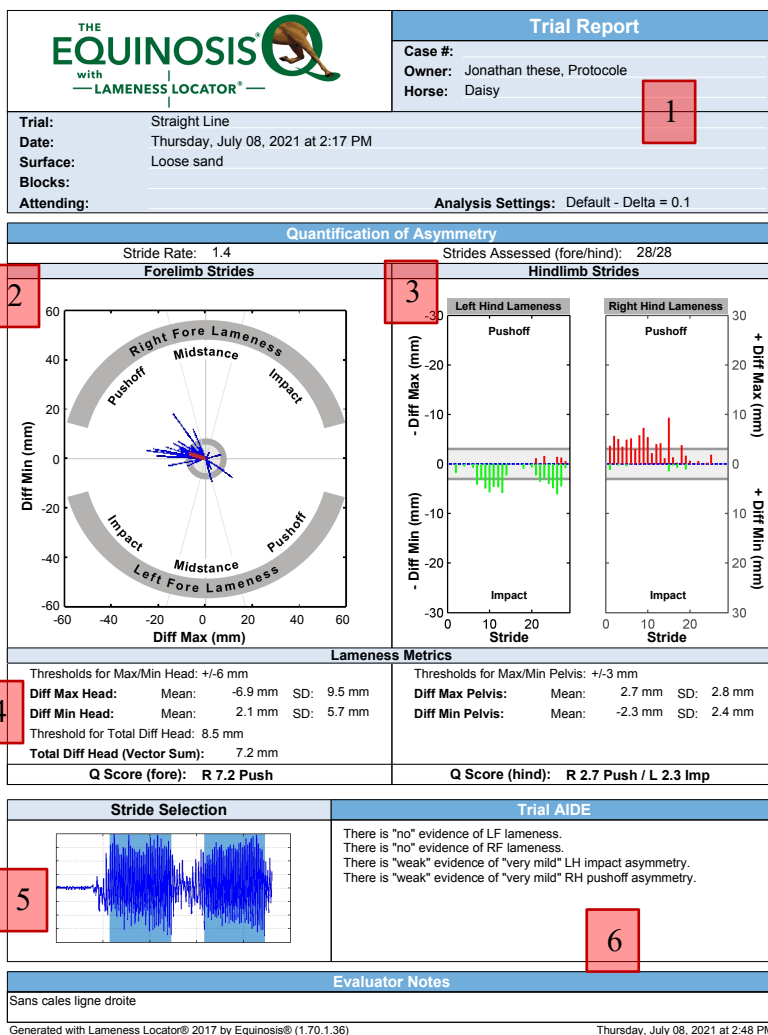
Les paramètres mesurés par le Lameness Locator® qui permettent d'analyser la locomotion du cheval, et que nous avons utilisé sont :

- Diff min Head : correspond à la différence entre la hauteur minimale de la tête lors de la première partie de la phase d'appui de l'antérieur droit et la hauteur minimale de la tête lors de la première partie de la phase d'appui de l'antérieur gauche.
- Diff max Head : correspond à la différence entre la hauteur maximale de la tête lors du poser du membre antérieur droit et la hauteur maximale de la tête lors du poser du membre antérieur gauche. (Causeret, 2019)

Ces paramètres sont mesurés pour chaque foulée, et une moyenne est calculée puis transmise à l'utilisateur directement sur le rapport de l'animal. Un écart type est également fourni. Le signe de la moyenne calculée pour chaque paramètre nous informe sur la latéralité de la boiterie, ainsi que sur son moment d'apparition.

Pour notre étude, nous ne nous intéresserons pas aux valeurs en elles-mêmes, mais aux variations de ces valeurs entre les mesures pour un même cheval, ou aux variations entre les valeurs des chevaux de l'étude. Ainsi, nous ne nous attarderons pas sur les limites retenues dans la littérature pour affirmer qu'une boiterie est présente ou non.

Les données sont affichées sur la tablette de l'utilisateur sous la forme de diagrammes de rayonnement, comme indiqué sur la figure 34 ci-dessous.



Légende :

1 = Informations sur le cheval et l'examen réalisé : type d'examen, sol, anesthésie tronculaire éventuelle ...

2 = Diagramme de rayonnement pour les membres antérieurs.

3 = Diagramme de rayonnement pour les membres postérieurs.

4 = Valeurs de l'examen pour Diff Head Max / Min, et Diff Pelvis Max / Min.

5 = Sélection des foulées par l'algorithme.

6 = Interprétation des valeurs fournis. Cette interprétation indique le(s) membre(s) boiteux, l'intensité de la boiterie, ainsi que le type de boiterie (d'impact ou de propulsion).

Figure 34 : Rapport d'examen fournit par la tablette Lameness Locator après chaque séance. (Photo J. Urlacher)

Pour notre étude, le cadre n°4 est celui qui nous intéresse le plus, puisqu'il nous donne les valeurs pour les paramètres choisis.

ii) Analyse du mouvement du bassin du cheval et paramètres étudiés

Lorsque le cheval se met en mouvement, la pointe du sacrum (épinos iliaques dorso-crânielles) décrit un mouvement vertical et symétrique par rapport à l'axe sagittal. Chez le cheval sain, cela s'apparente à la courbe décrite sur la figure 35.

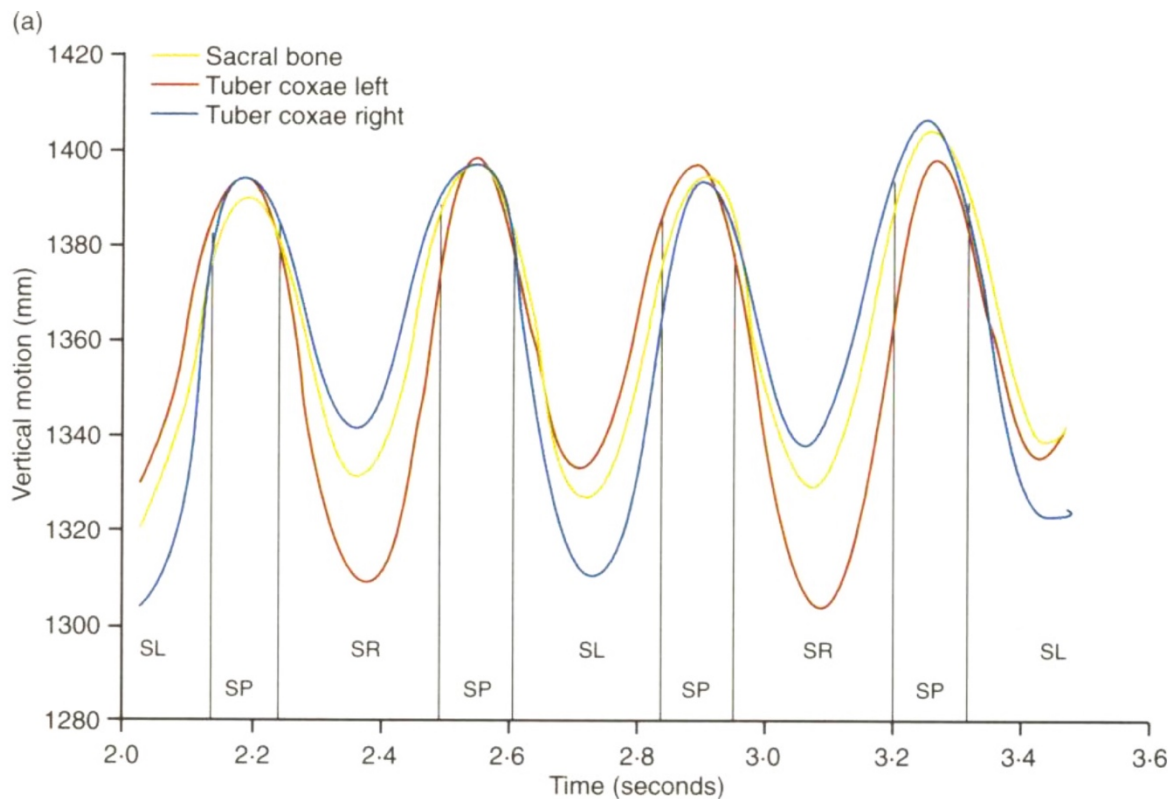


Figure 35 : Mouvement vertical du sacrum et des deux tuber coxae chez un cheval sain au trot. On observe que le déplacement du sacrum est identique à chaque foulée, et que le tuber coxae monte légèrement plus haut que le tuber coxae controlatéral lors de la phase d'appui du membre ipsilatéral.

SL = phase d'appui du membre postérieur gauche, SR = phase d'appui du membre postérieur droit,
 SP = phase de soutien (d'après Peham et al., 2001)

Le bassin descend lors de la première moitié de la phase d'appui, puis se relève pour atteindre une hauteur maximale lors de la phase de soutien.

Lorsqu'un cheval boite d'un membre postérieur, la symétrie de ce mouvement est modifiée. Les deux tubérosités coxales ne montent plus à la même hauteur lors de chaque foulée : lors du poser du membre douloureux, la descente du sacrum sera moins importante, et la tubérosité coxale ipsilatérale descend de façon plus importante (Peham *et al.*, 2001). Ces différences de symétries et modifications de la locomotion dues à la boiterie sont observables dans la figure 36.

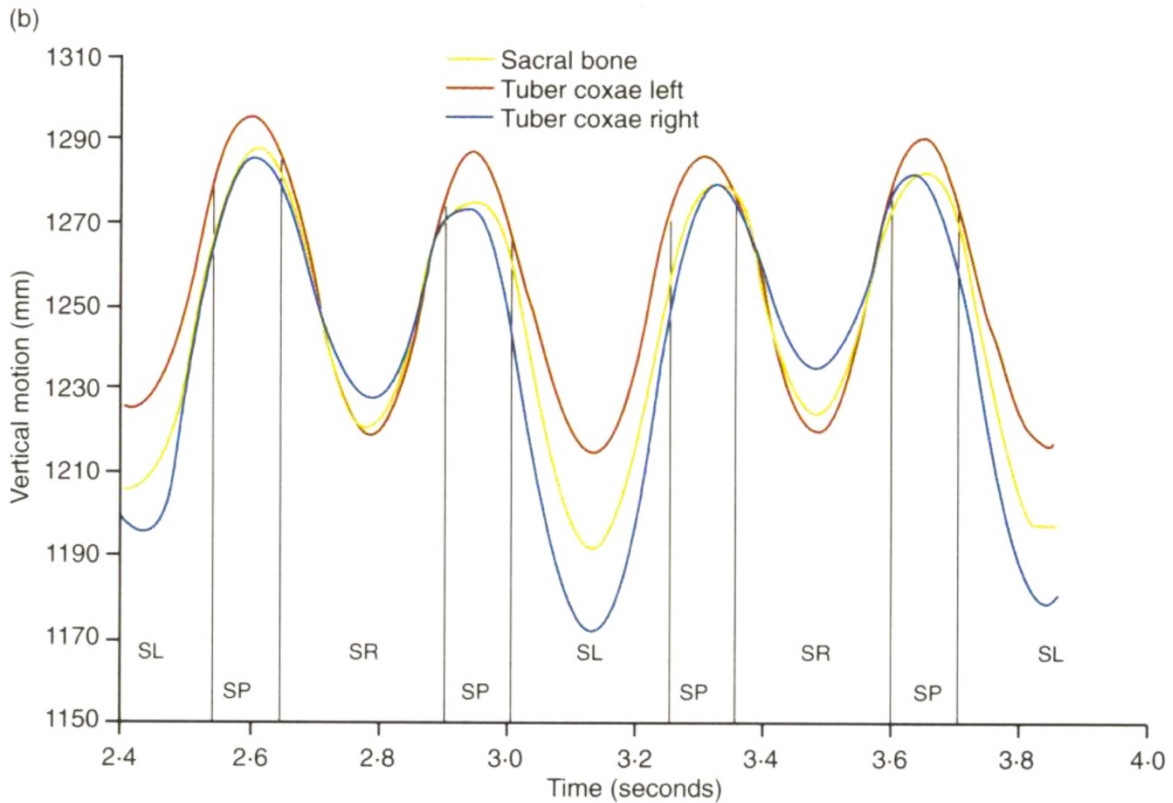


Figure 36 : Mouvement vertical du sacrum et des deux tuber coxae chez un cheval boitant du postérieur droit au trot. On observe que le déplacement du sacrum n'est plus identique à chaque foulée, et qu'il est légèrement moins haut lors de la phase d'appui du membre sain (postérieur gauche). On remarque également que le tuber coxae droit (membre douloureux) descend plus bas que le tuber coxae gauche.

SL = phase d'appui du membre postérieur gauche, SR = phase d'appui du membre postérieur droit,
 SP = phase de soutien (d'après Peham et al., 2001)

Pour notre étude, le capteur Lameness Locator® étant positionné sur la pointe du sacrum, dans l'axe sagittal du cheval, nous nous intéresserons surtout aux mouvements du sacrum. Nous avons vu que l'analyse de ce mouvement donne de précieuses informations sur la locomotion du cheval. Nous utilisons pour cela les valeurs fournies par le capteur.

Les paramètres mesurés par le Lameness Locator® qui permettent d'analyser la locomotion du cheval, et que nous avons utilisé sont :

- Diff min Pelvis : correspond à la différence entre la hauteur minimale du pelvis lors de la première partie de la phase d'appui de l'antérieur droit et la hauteur minimale du pelvis lors de la première partie de la phase d'appui de l'antérieur gauche.
- Diff max Pelvis : correspond à la différence entre la hauteur maximale du pelvis lors du poser du membre antérieur droit et la hauteur maximale du pelvis lors du poser du membre antérieur gauche. (Causeret, 2019)

Les paramètres issus du Lameness Locator® et retenus pour notre étude sont donc Diff max Head, Diff min Head pour l'analyse de la symétrie des antérieurs, et Diff max Pelvis et Diff min Pelvis pour l'analyse de la symétrie des postérieurs. Ce sont des paramètres précis et pratiques d'utilisation fournis directement dans la feuille de résultats du Lameness Locator®. Ces valeurs sont alors compilées dans un tableau Excel, à partir duquel nous pourrions réaliser une analyse statistique.

3) Analyse de la locomotion au moyen du système MS100 de Movin'Smart

a) Fonctionnement du système et utilisation

i) Principes généraux

Le système MS100 de la société Movin'Smart est un système permettant d'accéder en temps réel à de nombreux paramètres concernant la session de travail et le cheval monté (temps passé à chaque allure, vitesse, régularité de l'allure ...), et a été conçu pour les cavaliers désireux de progresser dans leur travail en connaissant ces paramètres. Il est composé de deux accéléromètres (un sur la tête du cheval et un sur le casque du cavalier) transmettant en temps réel les informations à une application préalablement installée sur le smartphone du cavalier.

La société Movin'Smart, qui nous a gracieusement prêté ce capteur, a accepté de nous mettre à disposition les données brutes issues de ses capteurs. Ainsi, nous pouvons les exploiter à l'aide du logiciel Matlab (un logiciel de programmation et de calcul numérique) pour calculer d'autres paramètres que ceux donnés par le capteur Lameness Locator®.

ii) Les capteurs

Le système MS100 est constitué de deux accéléromètres, qui se positionnent sur la nuque du cheval pour le premier, et sur la tête du cavalier pour le second. Ils enregistrent l'accélération dans les trois directions de l'espace, avec des acquisitions en moyenne toutes les 0,03 secondes.

Ils doivent être positionnés dans l'axe sagittal. Pour le cheval, le capteur se fixe sur la têtière grâce à un support en forme de pince. Pour le cavalier, un support se collant sur le casque permet de placer le capteur au sommet de la tête du cavalier (voir figure 37).



Figure 37 : Capteur MS100 du cheval (à gauche) et du cavalier (à droite) positionnés lors de l'examen. (Photos J. Urlacher)

Ils sont reliés en bluetooth au smartphone du cavalier, grâce à une application dédiée permettant de lancer l'acquisition et de l'arrêter. Les informations récoltées sont ensuite transférées sur un cloud où elles seront stockées, et l'analyse des données récoltées apparaît directement sur l'application qui fait office d'interface avec le cavalier. Pour notre étude, nous avons préféré récolter les données brutes issues des capteurs en plus de celles déjà traitées par l'algorithme de la société Movin'Smart et qui apparaissent dans l'application, ceci afin de traiter directement les données pour en tirer d'autres valeurs qui nous intéressent.

La figure 38 nous montre un extrait des valeurs brutes extraites des capteurs après acquisition : la première colonne contient le temps (en seconde), tandis que les colonnes 3, 4, 5 donnent les accélérations respectives selon les axes X, Y, et Z de la tête du cheval. Le capteur positionné sur la tête du cavalier donne, lui, les valeurs observées dans les colonnes 6, 7 et 8.

Kiss Me Devil Z

timestamp	event	horse_acc_x	horse_acc_y	horse_acc_z	jockey_acc_x	jockey_acc_y	jockey_acc_z	latitude	longitude	speed	total_distance	altitude
1624361000.21025	RHA	0.84033203125	0.0185546875	0.42431640625	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
1624361000.21127	RHA	0.82421875	0.02783203125	0.39111328125	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
1624361000.2114	RHA	0.828125	0.04541015625	0.361328125	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
1624361000.23291	RJA	NaN	NaN	NaN	0.3408203125	-0.0493164062	0.939453125	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
1624361000.23333	RJA	NaN	NaN	NaN	0.302734375	-0.0327148437	0.91357421875	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
1624361000.23406	RJA	NaN	NaN	NaN	0.2470703125	-0.0126953125	0.8759765625	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
1624361000.2403	RHA	0.806640625	0.0732421875	0.33447265625	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
1624361000.24111	RHA	0.74560546875	0.10595703125	0.30908203125	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
1624361000.2418	RHA	0.66455078125	0.13916015625	0.28857421875	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
1624361000.26327	RJA	NaN	NaN	NaN	0.197265625	0.01708984375	0.86572265625	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
1624361000.26363	RJA	NaN	NaN	NaN	0.1455078125	0.044921875	0.86474609375	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
1624361000.26462	RJA	NaN	NaN	NaN	0.08935546875	0.05810546875	0.85595703125	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
1624361000.27042	RHA	0.59814453125	0.14892578125	0.28515625	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
1624361000.27118	RHA	0.57763671875	0.1748046875	0.2919921875	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
1624361000.27213	RHA	0.60693359375	0.21044921875	0.3046875	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
1624361000.2935	RJA	NaN	NaN	NaN	0.04833984375	0.060546875	0.86669921875	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
1624361000.29424	RJA	NaN	NaN	NaN	0.0224609375	0.05859375	0.88232421875	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
1624361000.29544	RJA	NaN	NaN	NaN	0.0107421875	0.04931640625	0.88916015625	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
1624361000.30125	RHA	0.65625	0.2392578125	0.3125	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
1624361000.30171	RHA	0.67333984375	0.30029296875	0.30224609375	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
1624361000.30236	RHA	0.6552734375	0.34130859375	0.32470703125	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
1624361000.32348	RJA	NaN	NaN	NaN	0.009765625	0.03515625	0.9052734375	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
1624361000.3254	RJA	NaN	NaN	NaN	0.015625	0.0205078125	0.9375	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
1624361000.32547	RJA	NaN	NaN	NaN	0.02783203125	0.0078125	0.97607421875	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
1624361000.33069	RHA	0.64404296875	0.35009765625	0.3369140625	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN

Figure 38 : Données issues d'une phase de trot du cheval Kiss Me Devil Z équipé des capteurs Movin'Smart.(d'après Movin'Smart)

b) Méthode d'analyse

Pour l'étude de ces données du mouvement, deux programmes Matlab ont été utilisés. Le premier, codé entièrement pour cette étude avec l'aide précieuse de Mayeul Urlacher, étudiant ingénieur, permet de tracer les graphiques du mouvement et d'avoir accès à deux paramètres : la fréquence et l'amplitude. Le second programme Matlab, codé par la société Movin'Smart et resté strictement confidentiel, permet d'avoir accès à la symétrie et variabilité à la fois de la fréquence et de l'amplitude des foulées.

Notons que le premier programme a été codé en l'espace de 4 mois, et ne prétend en aucun cas rivaliser avec les programmes d'étude du mouvement mis en place par des sociétés privées depuis plusieurs années, et constamment améliorés. Malgré les imperfections qu'il contient, il permet d'avoir accès à des données intéressantes et qui méritent d'être intégrées dans notre étude si elles sont analysées prudemment.

i) Tracé d'un graphique

L'utilisation de ces capteurs nous permet d'obtenir des valeurs d'accélération en fonction du temps (figure 38). L'exploitation de ces données brutes a été réalisée avec le logiciel Matlab, sur lequel un programme a été codé.

Ce programme permet d'abord de tracer les courbes d'accélération (selon les trois dimensions de l'espace) en fonction du temps. La figure 39 est un exemple du type de courbe obtenu avec ce codage.

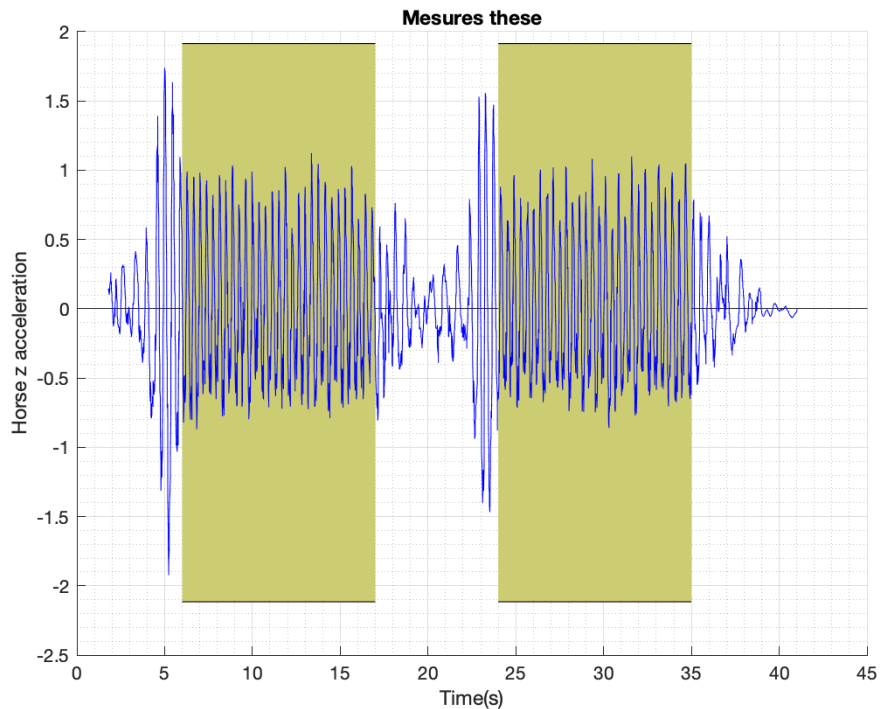


Figure 39 : Graphique représentant l'accélération verticale de la tête du cheval en fonction du temps, au cours d'une mesure en ligne droite. (Source : Logiciel Matlab)

Décrivons ce graphique afin de mettre en relation le déplacement physique du cheval avec le graphique obtenu :

- [0s ; 4s] : l'acquisition commence au pas, avec une amplitude très faible de la tête selon l'axe Z (axe vertical)
- [4s ; 6s] : le cheval se met au trot, et l'amplitude de la tête est donc la plus grande (le cheval effectue des grands mouvements de balanciers de la tête pour partir au trot)
- [6s ; 17s] : l'allure devient régulière, le mouvement de balancier de la tête est alors de type sinusoïdal.
- [17s ; 24s] : une fois arrivé au bout de la ligne droite, le cheval repasse au pas, effectue un demi-tour, puis repart au trot. Le mouvement de balancier de la tête diminue donc en amplitude, avant de ré-augmenter fortement lors du départ au trot.
- [24s ; 35s] : l'allure devient à nouveau régulière, et le mouvement de balancier de la tête est symétrique
- [35s ; 45s] : le cheval repasse au pas, le mouvement de la tête diminue donc en amplitude, jusqu'à l'arrêt de l'acquisition par le cavalier depuis son smartphone.

A partir de ces graphiques de l'accélération verticale en fonction du temps, on a pu sélectionner dans un second temps les plages de données intéressantes pour notre étude, c'est à dire les plages de données au cours desquelles le cheval est au trot, à une allure régulière, et ce suivant le tracé prévu pour la mesure. On élimine donc les plages de données au cours desquelles le cheval est au pas par exemple. Ces plages de données sont représentées par les rectangles de couleur jaune sur la figure 39, et ont été repérées visuellement sur le graphique représentant l'accélération verticale de la tête du cavalier. Elles sont reportées dans un tableur, comme montré sur la figure 40. Le repérage de ces plages de données est important puisqu'il conditionne les valeurs utilisées lors de l'analyse des données.

	A	B	C	D	E	F
1						
2		"/users/Jo/Documents/These/Mesures/Mesures these/Sapho/Sapho MS/Sapho des Orcets MS 1.csv"	[6,18; 28,38]			
3		"/users/Jo/Documents/These/Mesures/Mesures these/Sapho/Sapho MS/Sapho des Orcets MS 2.csv"	[5,42]			
4		"/users/Jo/Documents/These/Mesures/Mesures these/Sapho/Sapho MS/Sapho des Orcets MS 3.csv"	[20,60]			
5		"/users/Jo/Documents/These/Mesures/Mesures these/Sapho/Sapho MS/Sapho des Orcets MS 4.csv"	[7,20; 31,45]			
6		"/users/Jo/Documents/These/Mesures/Mesures these/Sapho/Sapho MS/Sapho des Orcets MS 5.csv"	[5,56]			
7		"/users/Jo/Documents/These/Mesures/Mesures these/Sapho/Sapho MS/Sapho des Orcets MS 6.csv"	[11,60]			
8		"/users/Jo/Documents/These/Mesures/Mesures these/Sapho/Sapho MS/Sapho des Orcets MS 7.csv"	[5,20; 30,45]			
9		"/users/Jo/Documents/These/Mesures/Mesures these/Sapho/Sapho MS/Sapho des Orcets MS 8.csv"	[6,46]			
10		"/users/Jo/Documents/These/Mesures/Mesures these/Sapho/Sapho MS/Sapho des Orcets MS 9.csv"	[6,43]			
11		"/users/Jo/Documents/These/Mesures/Mesures these/Sapho/Sapho MS/Sapho des Orcets MS 10_D.csv"	[5,21; 34,49]			
12		"/users/Jo/Documents/These/Mesures/Mesures these/Sapho/Sapho MS/Sapho des Orcets MS 11_D.csv"	[6,52]			
13		"/users/Jo/Documents/These/Mesures/Mesures these/Sapho/Sapho MS/Sapho des Orcets MS 12_D.csv"	[6,47]			
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						
21						
22						
23						
24						

Chevaux de l'étude → Trottings réalisés lors de mesures

← Découpage des périodes (en secondes) pertinentes pour chaque trotting

Figure 40 : Tableau des plages de données sélectionnées pour chaque cheval.

Une fois le graphique tracé et les plages de données pertinentes sélectionnées, nous avons codé dans Matlab un programme qui ne s'intéresse qu'aux plages de données pertinentes. Ainsi, tous ce que nous allons voir dans les prochains paragraphes n'est appliqué que sur les plages de données sélectionnées (en jaune sur le graphique).

ii) Étude du mouvement à l'aide du capteur MS100

Lorsqu'un cheval trotte à une allure régulière, sa tête décrit un mouvement de balancier suivant une sinusoïde, et donc avec une fréquence et une amplitude propre. L'étude de ce mouvement de la tête fournit énormément d'informations sur la locomotion du cheval. En effet, sur le même principe que pour le Lameness Locator®, nous recherchons des irrégularités dans le mouvement sinusoïdal de la tête lors des mesures avec les différents équilibres de selle : si des paramètres du mouvement de la tête sont modifiés, nous pourrions conclure que cette modification d'équilibre de la selle a engendré une modification dans la locomotion.

α) Étude de la fréquence du mouvement

Le premier bloc de code s'intéresse à la fréquence du mouvement de balancier de la tête du cheval. Si cette fréquence est modifiée, cela signifie que la locomotion du cheval n'est plus la même. Une fréquence qui augmente traduit des mouvements de balancier de la tête du cheval plus rapides : cela peut être le cas, par exemple, pour un cheval qui a une allure précipitée, ou étriquée, avec des amplitudes de foulée diminuées. Une fréquence qui diminue traduira plutôt un cheval qui ralentit son allure, ou qui décompose de manière plus importante ses mouvements, avec un rebond augmenté par exemple.

Pour accéder à cette information, nous avons utilisé la densité spectrale de puissance (PSD). Selon l'analyse de Fourier, tout signal physique continu peut être décomposé comme une somme (finie ou infinie) de signaux sinusoïdaux d'amplitude et de fréquence variable. Cet ensemble de fréquences et leurs amplitudes associées forment ainsi le spectre de puissance du signal. Ainsi, tout signal pouvant être représenté comme une variable qui varie dans le temps a un spectre de fréquences correspondant (Feltek, 2014). La répartition fréquentielle de la puissance d'un signal suivant les fréquences qui le composent représente la densité spectrale de puissance. C'est donc la puissance présente dans le signal en fonction de la fréquence, par unité de fréquence. Elle est couramment exprimée en watts par hertz (W/Hz). (Maral, 2003)

Rq : mathématiquement parlant, elle est définie comme étant le carré du module de la transformée de Fourier, divisé par la largeur de bande spectrale, elle-même égale à l'inverse du temps d'intégration. Étant donné que le logiciel Matlab effectue ces calculs pour nous, nous ne rentrons pas plus dans le détail des calculs.

L'étude de la PSD nous permet donc de savoir quelles fréquences sont prédominantes dans notre signal. Cela est représenté visuellement sur la figure 41 ci-dessous : les cercles rouges repèrent les trois fréquences prédominantes du signal (le signal étant le mouvement de la tête du cheval au cours de la mesure), et ces dernières seront retrouvées dans un tableau les compilant toutes.

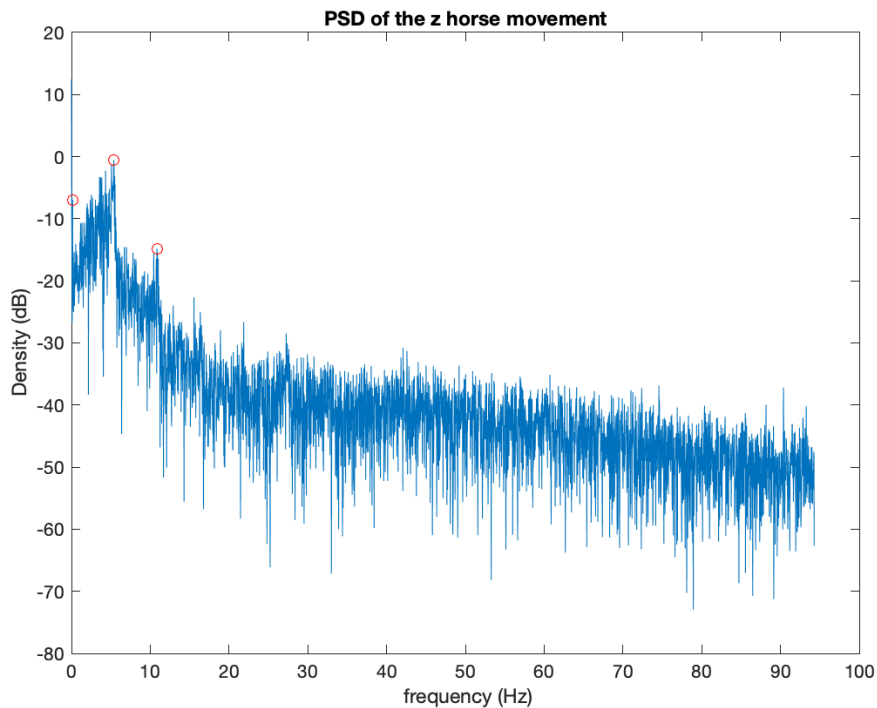


Figure 41 : Diagramme de la densité spectral de puissance d'une phase de trot de Flora. Le pic à 0 Hz représente la composante continue du signal, le signal initial n'étant pas centré sur zéro.

β) Étude de l'amplitude du mouvement

Le second bloc de code s'intéresse, lui, à l'amplitude verticale du mouvement de la tête du cheval. Pour l'étudier, nous avons codé dans Matlab un bloc de code qui cherchait le maximum du signal. Une fois ce premier maximum trouvé, il continuait de parcourir le signal et cherchait ensuite la valeur minimale qui suivait. Une fois cette valeur trouvée, il calculait l'amplitude entre ces deux extremums, puis répétait cette opération, en cherchant le maximum qui suivait, en stockant la valeur d'amplitude calculée, et ainsi de suite. Ceci nous permet d'obtenir deux paramètres intéressants.

La régularité des amplitudes au cours de la mesure est le premier paramètre qui nous intéresse. Une irrégularité peut en effet traduire un inconfort, voir une boiterie si cette irrégularité est constante. Nous rappelons qu'un cheval qui boite verra son mouvement de balancier de la tête modifié. Pour objectiver cette régularité, nous avons calculé l'écart type de l'amplitude.

Le deuxième paramètre qu'il est intéressant de prendre en compte lorsqu'on parle d'amplitude est l'amplitude moyenne au cours de la mesure. En effet, cette valeur traduit l'attitude générale du cheval au cours de la mesure. Des mouvements amples, déliés, se traduiront par un balancier tête encolure ayant une amplitude moyenne. Si cette amplitude est diminuée, le complexe tête-encolure du cheval est alors moins mobile (ou mobilisé), et cela

peut provenir d'un cheval qui est anormalement raide, ou à des allures étriquées, car la selle le gêne par exemple. Cette valeur d'amplitude moyenne est calculée comme la moyenne de toutes les amplitudes relevées au cours de la mesure.



Figure 42 : Repérage des extremums du mouvement vertical de la tête d'un cheval boitant de l'antérieur gauche sous Matlab. Chaque cercle rouge repère un extremum haut, et chaque cercle vert représente un extremum bas. Cela permet de calculer les amplitudes de chaque mouvement de tête. Ces amplitudes sont ensuite stockées dans un tableur Excell.

Nous avons donc codé un programme sous Matlab qui nous donne plusieurs paramètres intéressants : l'aperçu visuel sous forme de graphique, la fréquence du mouvement, son amplitude moyenne, et la régularité de son amplitude. D'autres paramètres ont été utilisés pour étudier le mouvement, et ce sont ceux fournis directement par Movin'Smart en utilisant leur programme d'étude du mouvement.

γ) Étude de la symétrie à l'aide du programme de la société Movin'Smart

Afin d'obtenir de plus nombreux paramètres caractérisant le mouvement, la société Movin'Smart, qui nous prête un jeu de capteur MS100 pour cette étude, a accepté de faire passer nos mesures (données brutes) dans ses algorithmes d'analyse de symétrie. Ces derniers permettent de réaliser deux analyses : une analyse de la fréquence des foulées et une analyse de l'amplitude latérale des foulées, et fournissent donc des informations précieuses pour notre étude.

Pour cela, l'algorithme commence par repérer les périodes de trot. Si le cheval repasse au pas, ou s'arrête, ce ne sera pas pris en compte dans l'analyse jusqu'à ce qu'il reparte au trot. Cela est bien visualisable sur les figures 43 à 45. Dans la figure 43, le cheval part au trot et ne change pas d'allure avant la fin de la mesure : nous avons donc une seule phase de trot qui sera analysée en entier. En revanche, dans les figures 44 et 45, le cheval repasse au pas au milieu de la mesure, et l'algorithme repère donc 2, voir 3 phases de trot distinctes : elles seront alors analysées bout à bout, sans considérer les zones de pas.

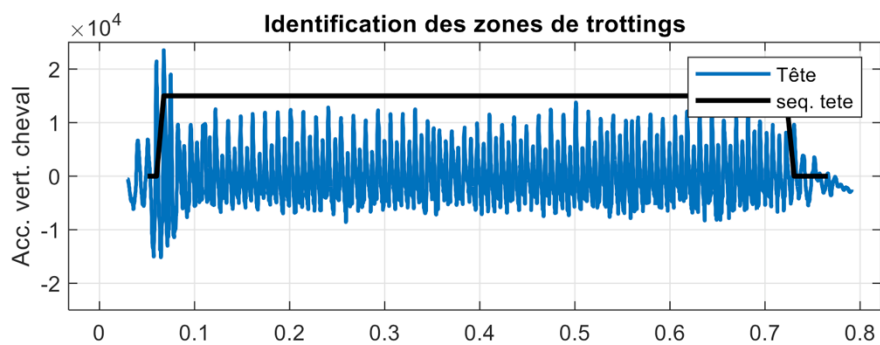


Figure 43 : Identification des zones de trot sur un cheval ne repassant pas au pas (Source : Movin'Smart).

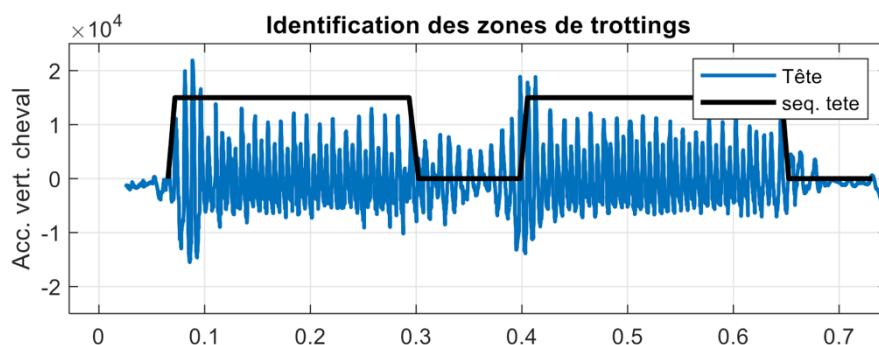


Figure 44 : Identifications des zones de trot chez un cheval repassant une fois au pas (Source : Movin'Smart).

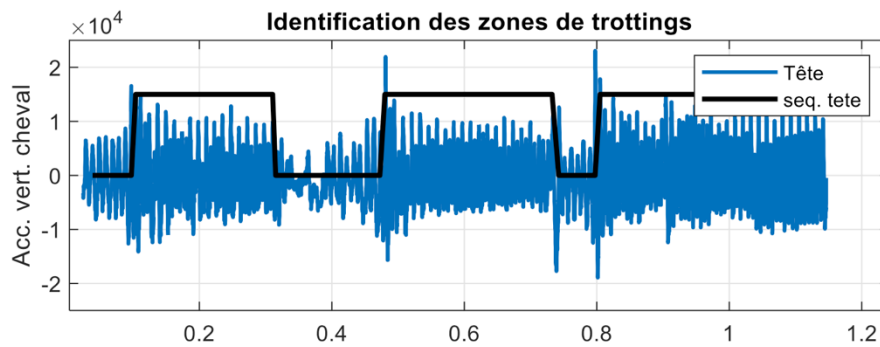


Figure 45 : : Identifications des zones de trot chez un cheval repassant deux fois au pas (Source : Movin'Smart).

Une fois ces zones de trot repérées, un premier algorithme analyse les fréquences de foulées pour le diagonal droit, et pour le diagonal gauche. Pour chaque foulée, le rapport entre la fréquence des foulées du diagonal droit et la fréquence des foulées du diagonal gauche est calculé. La moyenne de ce rapport donne la variable « Sym Ff » (pour symétrie fréquence foulées). On s'intéresse également à la variabilité de la fréquence des foulées (variable « Var Ff »). Pour cela, on utilise la formule suivante :

$$Var Ff = 100 * (iqr * \left(\frac{données}{moyenne}\right))$$

Avec : iqr = écart inter quartiles

La variation entre les fréquences du diagonal droit et celles du diagonal gauche est une manière de représenter la dispersion des données. Visuellement, cela est représenté sur les diagrammes suivants (figure 46), pour lesquels une mesure contenant deux périodes de trot a été analysée : à gauche, on retrouve le rapport des symétries des foulées, avec deux valeurs car deux phases de trot ont été repérées par l'algorithme. A droite, la variabilité associée à chaque rapport est affichée (en utilisant la formule ce dessus).

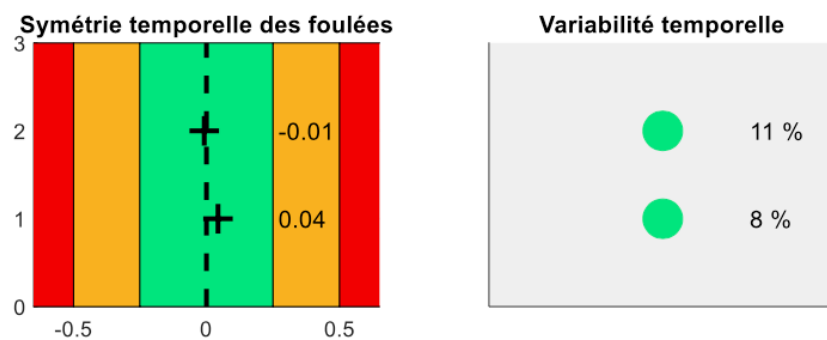


Figure 46 : Graphiques représentant la symétrie temporelle des foulées ainsi que la variabilité associée (Source : Movin'Smart).

Ensuite, un deuxième algorithme analyse les amplitudes de foulées pour chaque diagonal (droit et gauche). Pour chaque foulée, le programme calcule le rapport entre les amplitudes latérales des foulées du diagonal droit et les amplitudes latérales des foulées du diagonal gauche. La moyenne de ce rapport est donnée par la variable Sym Amp (pour symétrie des amplitudes). On s'intéresse également à la variabilité des amplitudes (calculée comme précédemment), qui est donnée par la variable Var Amp.

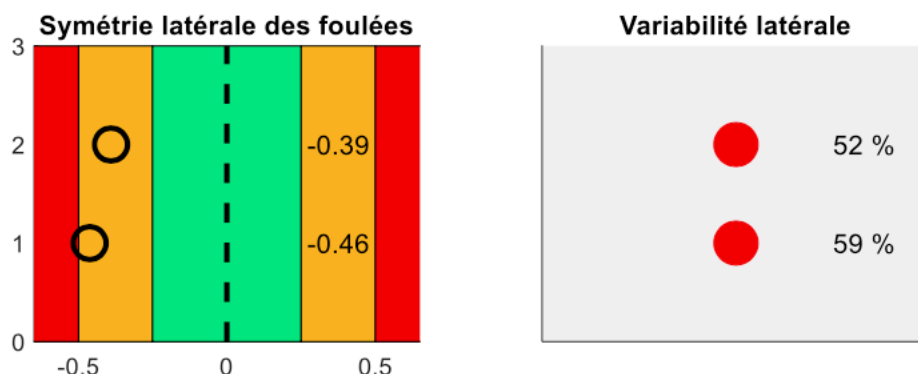


Figure 47 : Graphiques représentant la symétrie latérale des foulées ainsi que la variabilité associée (Source : Movin'Smart).

Ces graphiques permettent de visualiser les données qui sont récoltées. Ces dernières sont toutes regroupées dans un tableur Excel, avec les données issues du Lameness Locator®, afin de procéder à une analyse statistique de l'ensemble des données.

C) Protocoles expérimentaux

Avec le tapis à cales et ces deux capteurs à notre disposition, nous pouvons réaliser des mesures sur les deux groupes de chevaux recrutés afin d'obtenir des résultats à analyser. Deux protocoles ont été utilisés, décrits ci-après, chacun permettant d'étudier des conditions un peu différentes.

1) Première expérimentation : le déséquilibre de la selle

Pour ce premier protocole, induire un déséquilibre de la selle était l'objectif principal de l'utilisation du tapis à cales. Dans cette optique, les cales étaient disposées sur le tapis de telle sorte que les matelassures soient en contact continu avec ces dernières, formant une pente sur laquelle reposait la selle. Ainsi, il n'y avait pas de points de pression exagérée, mais un déséquilibre de la selle, et donc du cavalier, selon l'axe longitudinal. Pour cela, deux épaisseurs

de cales en feutres étaient disposées à une extrémité du tapis (avant ou arrière), et on complétait avec une épaisseur de cale au milieu du tapis, du même côté (figures 48 et 49), afin que la selle repose sur toute la longueur du tapis.



Figure 48 : Exemple de disposition des cales sur le tapis de l'étude pour l'expérimentation n°1 (vue de dessus). (Photo J. Urlacher)

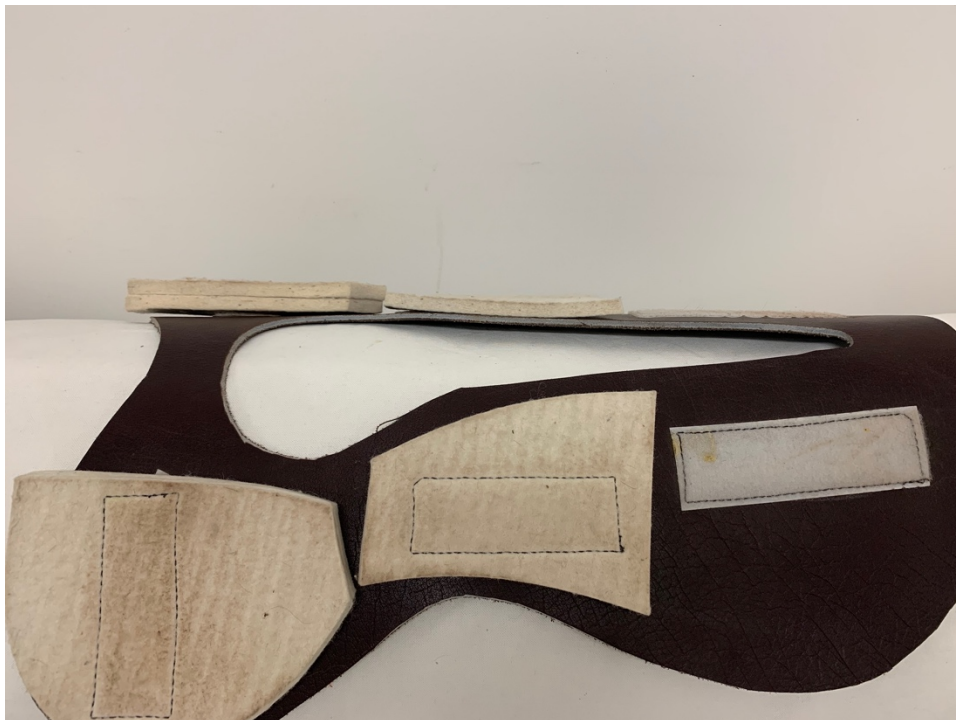


Figure 49 : Exemple de disposition des cales sur le tapis de l'étude pour l'expérimentation n°1 (vue de profil). (Photo J. Urlacher)

Pour ce protocole, toutes les mesures ont été réalisées avec le même cavalier, la même selle, et le même sol, afin de s'affranchir au maximum de biais liés à l'environnement lors des mesures. Le cavalier professionnel Axel Delord a eu la gentillesse de monter neuf chevaux pour notre étude, au sein des écuries d'Arnas La Sauvageonne. La carrière sur laquelle les mesures étaient réalisées est une carrière en Toubin-Clément de 70 mètres par 35 mètres. La selle utilisée est une selle d'obstacle Forestier (taille 17,5). Les mesures ont été réalisées dans un intervalle de temps d'un mois, pour limiter au maximum les biais liés aux conditions climatiques. Enfin, l'ensemble des mesures sur un même cheval a toujours été réalisé sur la même journée, pour s'affranchir d'un éventuel biais lié à l'âge de la ferrure.

Avant d'effectuer les mesures sur un cheval, il était observé en main en ligne droite au pas, puis au trot, afin d'écarter tout cheval boiteux ou douteux de l'étude. Un test de sensibilité du dos était également réalisé, par palpation, afin d'écarter tout cheval souffrant de dorsalgies.

Une fois cet examen dynamique et statique réalisé, le cheval était inclus dans l'étude et la mesure se déroulait comme décrit ci-après :

- 1) Mise en place des capteurs MS100 et Lameness Locator® sur le cheval, ainsi que sur la bombe du cavalier.
- 2) Préparation du cheval avec son équipement habituel, auquel on ajoute le tapis de l'étude mais sans aucune cale en feutre.
- 3) Échauffement du cheval sous la selle durant environ 15 minutes.
- 4) Une fois le cheval échauffé, le cavalier place son cheval à l'arrêt, et lance depuis son smartphone une première acquisition pour les capteurs MS100. De notre côté, nous lançons simultanément une acquisition pour les capteurs Lameness Locator® depuis la tablette connectée. Le cavalier s'élance alors pour un aller-retour au trot assis sur une distance de 30 mètres. A la fin de cet aller-retour, les deux acquisitions sont arrêtées. Une nouvelle acquisition est alors lancée et le cavalier effectue deux cercles de 20 mètres de diamètre au trot assis à main droite. Puis une dernière acquisition est lancée pour deux cercles de 20 mètres de diamètre au trot assis à main gauche.
- 5) Une fois ces trois exercices réalisés, le cavalier descend de cheval, et les cales en feutre (deux épaisseurs à l'arrière et une épaisseur au milieu) sont placées sur le tapis. Le cheval est sellé à nouveau, et le cavalier se remet en selle. Trois nouvelles acquisitions (aller-retour en ligne droite, cercles à main droite, et cercles à main gauche) sont alors réalisées selon le schéma décrit à l'étape 4.
- 6) On desselle ensuite le cheval pour placer les cales en feutre à l'avant (deux épaisseurs à l'avant et une épaisseur au milieu) cette fois ci, puis le cavalier se remet en selle pour effectuer trois nouvelles acquisitions, toujours selon le schéma décrit à l'étape 4.
- 7) Enfin, cette opération est réalisée une dernière fois en positionnant les cales sur la partie gauche, ou droite du tapis (alternativement une fois sur deux, deux épaisseurs de cales sur l'ensemble du côté choisi), et en réalisant trois nouvelles acquisitions.
- 8) Le cheval est dessellé et débarrassé de tous capteurs.

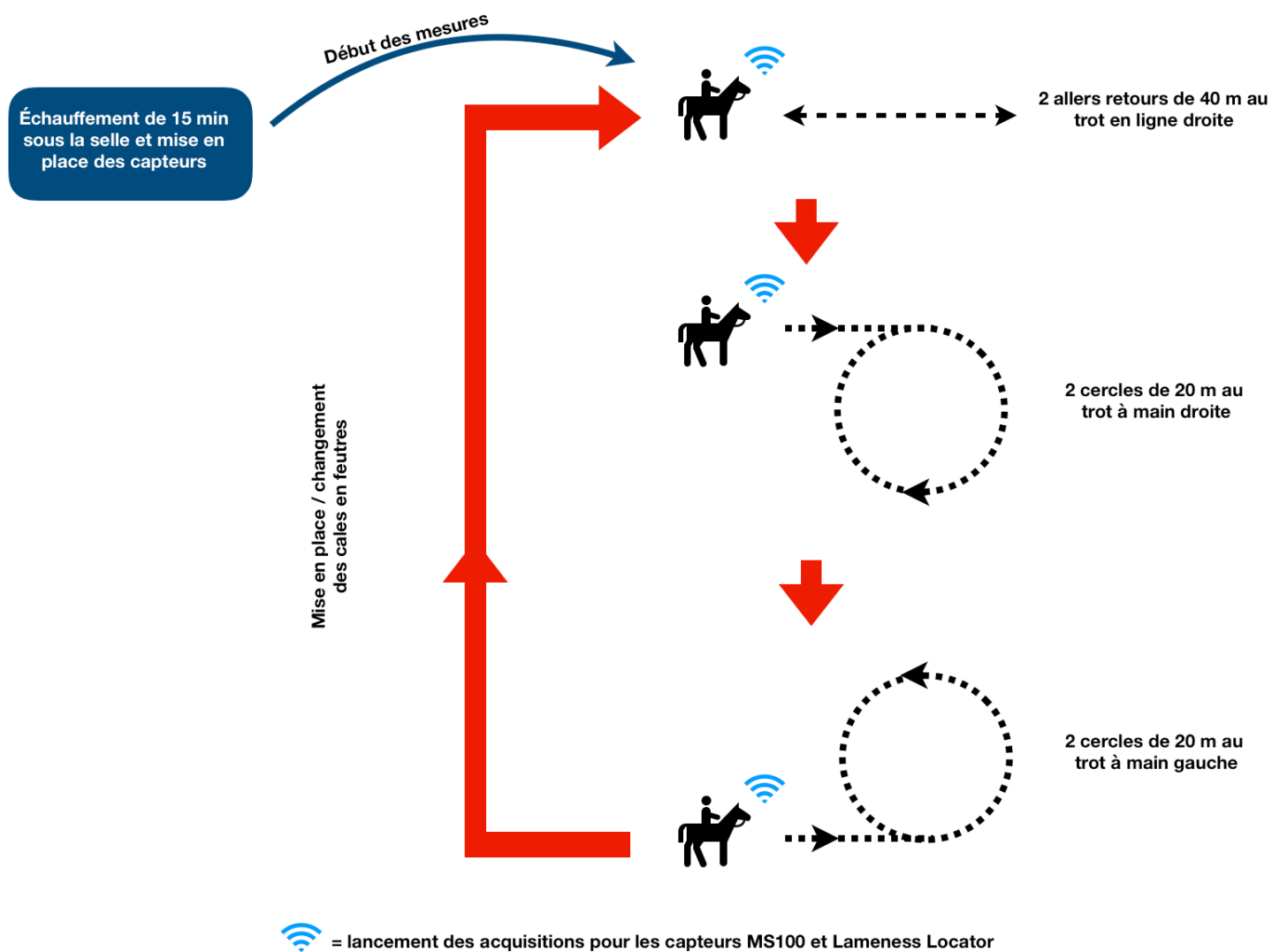


Figure 50 : Schéma récapitulatif du déroulement d'une mesure suivant le protocole décrit précédemment. (Photo J. Urlacher)

2) Deuxième expérimentation : la pression exagérée de la selle

Pour ce second protocole, l'objectif principal de l'utilisation du tapis à cales était d'induire des pressions exagérées, durant les séances de travail au trot, sur la région du garrot ou la région lombaire. Pour cela, les cales étaient disposées sur le tapis de telle sorte que les matelassures ne soient pas en contact continu avec la selle, et donc, que les cales puissent induire une pression importante sur le dos en raison de leur surface de contact limitée.

Ceci était mis en place en disposant deux épaisseurs de cales en feutres à une extrémité du tapis (avant ou arrière), et en ne complétant pas avec une épaisseur de cale au milieu du tapis (figures 51 et 52).



Figure 51 : Exemple de disposition des cales sur le tapis de l'étude pour l'expérimentation n°2 (vue de dessus). (Photo J. Urlacher)



Figure 52 : Exemple de disposition des cales sur le tapis de l'étude pour l'expérimentation n°2 (vue de profil). (Photo J. Urlacher)

Pour ce protocole, toutes les mesures ont été réalisées avec la même cavalière, la même selle, et le même sol, afin de s'affranchir au maximum de biais liés à l'environnement lors des mesures. La cavalière Myriam Rambaud-Méasson a eu la gentillesse de monter cinq chevaux pour notre étude, au sein des écuries du Cross de la Colline. La carrière sur laquelle les mesures étaient réalisées est une carrière en Toubin-Clément de 50 mètres de long par 25 mètres de large. La selle utilisée est une selle d'obstacle Meyer (taille 17). Les mesures ont été réalisées dans un intervalle de temps d'un mois, pour limiter au maximum les biais liés aux conditions climatiques. Enfin, l'ensemble des mesures sur un même cheval a toujours été réalisé sur la même journée, pour s'affranchir d'un éventuel biais.

Avant d'effectuer les mesures sur un cheval, il était observé en main en ligne droite au pas, puis au trot, afin d'écarter tout cheval boiteux ou douteux de l'étude. Un test de sensibilité du dos était également réalisé, par palpation, afin d'écarter tout cheval souffrant de dorsalgies.

Une fois cet examen dynamique et statique réalisé, le cheval était inclus dans l'étude et la mesure se déroulait comme décrit précédemment, suivant le même protocole (figure 50), à la différence près que les cales utilisées étaient les suivantes pour les différentes phases de trot :

- Premier exercice : aucune cale sur le tapis.
- Puis deux épaisseurs de cales à l'arrière seulement.
- Puis deux épaisseurs de cales à l'avant seulement.
- Et enfin deux épaisseurs de cales au milieu à gauche uniquement.

D) Analyse statistique

L'analyse statistique des données a été réalisée avec les données quantitatives issues des capteurs Lameness Locator® et MS100 (Diff max head, Diff min head, Diff max pelvis, Diff min pelvis, Fréquence prédominante, Amplitude moy, Amplitude SD, Sym Ff, Var Ff, Sym amp, Var amp). Elle a été réalisée avec le logiciel R studio, version 2021.09.1. Nous avons regroupé sous le nom de « condition » les différents tapis utilisés pour les mesures (sans cales, avec cales à l'avant, avec cales à l'arrière, ou avec cales sur le côté), et sous le nom de « test » les différentes phases de trot de chaque mesure (en ligne droite, en cercle à main droite, ou en cercle à main gauche). Ainsi, après vérification de la validité du modèle, nous avons croisé l'ensemble des données : la recherche de l'influence de la selle sur la locomotion a été faite en cherchant une influence de la condition seulement, une influence du test seulement, et une influence croisée de la condition et du test. Un résultat était jugé significatif à partir d'une valeur de la p-value inférieure à 0,05.

Pour cela, nous avons utilisé un modèle linéaire généralisé à effets mixtes. C'est une extension du modèle linéaire généralisé dans lequel le prédicteur contient des effets aléatoires en plus des effets fixes. Les packages « lme4 », « lmerTest », « MuMin », « multcomp », « lsmeans », « ggpubr » et « ggplot2 » ont été utilisés.

III) Résultats

Les données récoltées sont regroupées dans des tableaux visibles en annexes. Suite à l'analyse statistique de ces données, très peu de modifications significatives de la locomotion sont objectivement observées chez les chevaux de l'étude.

Pour les deux séries de mesures, on observe avec l'étude statistique que le test (ligne droite, cercle à droite, ou cercle à gauche) influence les résultats. Cela signifie que pour chaque paramètre étudié, le fait que le cheval trotte en ligne droite, ou en cercle aux différentes mains modifie les résultats. Cela ne nous donne pas d'information sur l'effet du tapis, et ne concerne que les tests.

Concernant la première expérimentation, étudiant surtout l'effet d'une modification de l'équilibre de la selle induite par le tapis, l'analyse statistique ne montre aucune variation dans les paramètres fournis par les capteurs pour la condition, ou pour la condition croisée avec le test (annexe 4).

En revanche, l'expérimentation n°2, qui s'intéressait plus à la pression excessive de la selle induite par le tapis, montre que le test semble influencer les données des capteurs. En effet, pour les paramètres *Fréquence prédominante*, *Amplitude Moy*, et *Amplitude SD*, l'analyse trouve une p-value < 0,05. Cela signifie que l'étude statistique repère une différence significative pour ces trois paramètres mesurés avec le capteur Movin'Smart, lorsque l'on combine le tapis et la trajectoire du cheval. Donc le tapis n'a un effet significatif que selon certaines trajectoires, qui est le plus marqué en ligne droite. Une tendance est observée pour ces trois paramètres en ligne droite, et est visible sur les graphiques suivants :

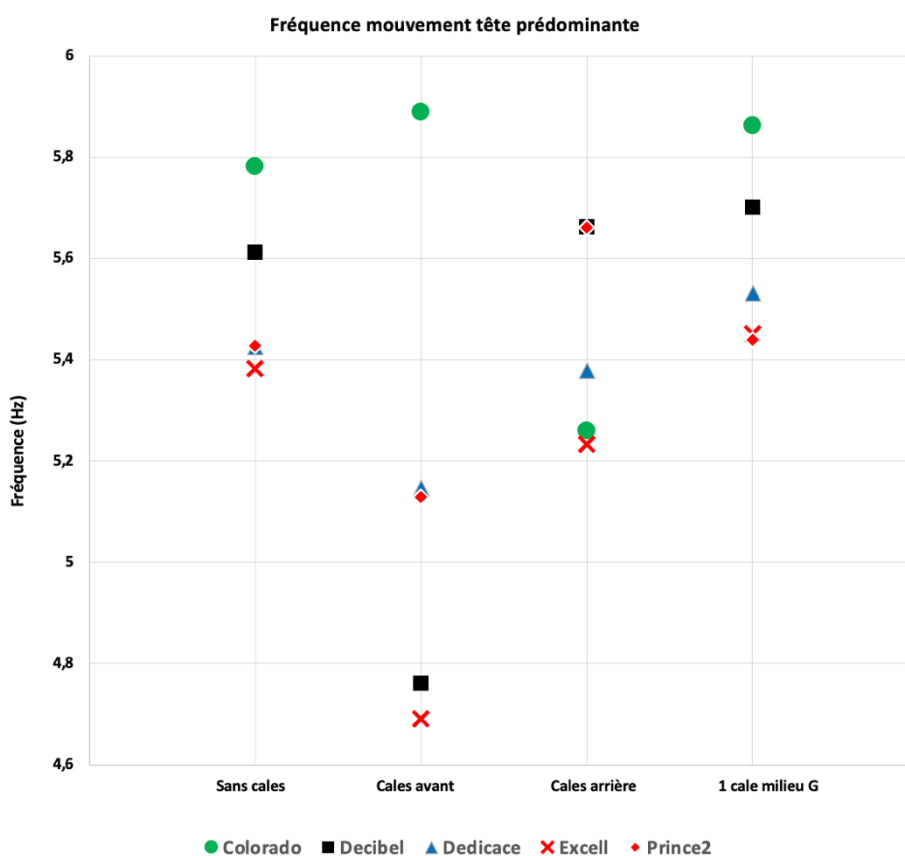


Figure 53 : Fréquence prédominante du mouvement vertical de la tête du cheval en fonction des cales mises en place sur le tapis. Lignes droites uniquement.

Amplitudes verticales moyennes du mouvement de la tête du cheval

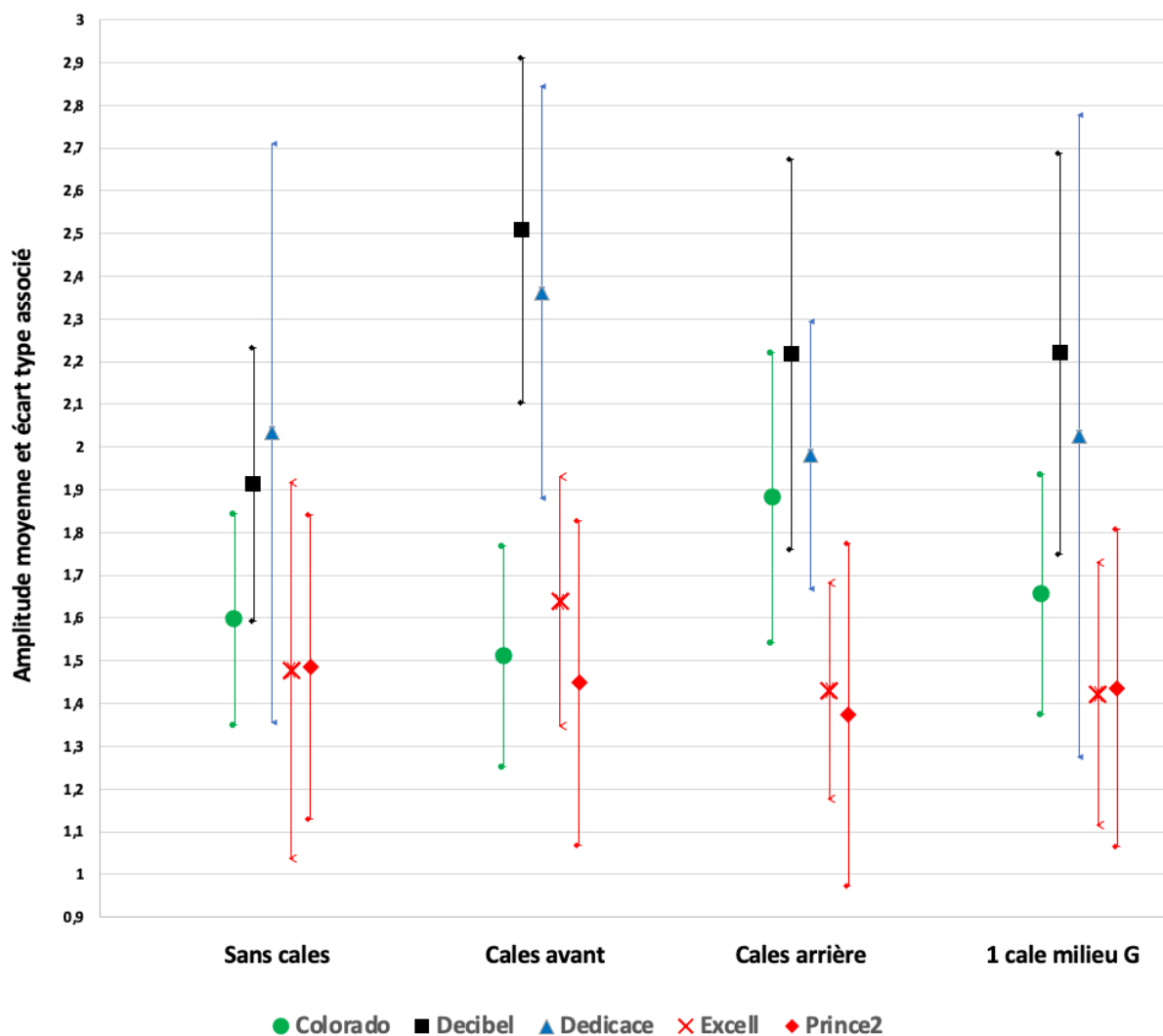


Figure 54 : Amplitude moyenne et écarts types associés du mouvement vertical de la tête du cheval en fonction des cales mises en place sur le tapis. Lignes droites uniquement.

Pour les autres paramètres de la locomotion étudiés, aucune tendance ou effet significatif n'a été observé (annexe 5).

IV) Discussion

Lors des mesures avec les cales en place, l'impression ressentie par les cavaliers qui montaient, ainsi que par moi-même qui observait les chevaux au trot, était une impression de chevaux « étriqués », c'est à dire des chevaux qui se déplaçaient avec moins d'amplitude et moins de souplesse que lorsqu'ils étaient montés sans les cales. Cette impression commune fut ressentie sur l'ensemble des chevaux lors des deux expérimentations. Cette gêne (ressentie ou observée) chez les chevaux durant les mesures était plus importante lors de la mise en place des cales à l'avant, ou à l'arrière selon les individus. On remarque que les chevaux osseux, au dos fort, et à la musculature bien développée ont tendance à être gênés lors des séances avec les cales placées à l'avant (région du garrot), tandis que les chevaux plus fins, avec un profil plus effilé ou présentant une musculature moins développée ont plutôt tendance à être gênés lors des séances avec les cales positionnées à l'arrière (région lombaire). En revanche, le fait de mettre des cales sur le côté, ou le fait de ne placer qu'une seule cale au milieu à gauche ne modifiait pas la locomotion du cheval (toujours d'un point de vue subjectif).

Nous avons donc, après ces deux séries de mesures, peu de résultats significatifs montrant une influence du tapis sur la locomotion du cheval. Si nous interprétons les résultats fournis, le positionnement des cales à l'arrière du tapis diminuerait la fréquence du mouvement vertical de la tête du cheval, et augmenterait l'amplitude de ce mouvement. Le seul cheval pour lequel l'effet est inversé est Colorado, qui est un cheval costaud et osseux : le positionnement des cales à l'avant influence son mouvement de tête de façon plus importante, en augmentant la fréquence du mouvement et en diminuant l'amplitude moyenne.

Une influence des pressions exagérées de la selle serait donc observée, avec une diminution de fréquence et une augmentation d'amplitude du mouvement de la tête associées à une pression exagérée en région lombaire. Mais ces résultats sont à interpréter avec prudence : les trois indicateurs pour lesquels une différence dans la locomotion est observée sont ceux issus de l'algorithme codé spécifiquement pour cette étude. Et bien que cet algorithme soit travaillé et réfléchi, il est loin d'être abouti et aussi précis que ceux mis en place par des équipes ayant travaillé depuis plusieurs années sur le sujet (tels que les algorithmes des capteurs utilisés). Or, les paramètres fournis par les algorithmes des capteurs ne montrent aucune différence significative, ni aucune tendance exploitable concernant une quelconque modification de la locomotion du cheval.

Ce sont donc des résultats qui restent essentiellement subjectifs. Nous nous attendions à voir des modifications objectives de la locomotion à l'aide des deux systèmes de capteurs utilisés, d'autant plus que durant les mesures, les chevaux ne semblaient pas indifférents à la mise en place des cales.

Certains choix dans notre étude peuvent en partie expliquer ces résultats. Premièrement, la distance parcourue par le cheval durant la mesure, ainsi que le temps durant lequel il a eu le tapis sous la selle, sont relativement courts. En effet, il faut un peu plus de 45 min pour effectuer l'ensemble des mesures d'un cheval (en comptant la mise en place des cales entre chaque

exercice), durant lesquelles environ 800 mètres sont parcourus. Le cheval est donc dans des conditions « inconfortables », avec une selle mal adaptée, pendant moins d'une heure, et parcourt moins d'un kilomètre avec cette selle. Il est possible que cela ne soit pas suffisant pour mesurer un inconfort léger à modéré chez le cheval. Certes, lorsqu'une selle est franchement inadaptée au dos d'un cheval, des réactions de défenses immédiates et intenses peuvent apparaître, accompagnées le plus souvent de gênes dans la locomotion. Mais dans le cas d'une selle qui n'est que légèrement inadaptée au cheval, une gêne peut n'apparaître qu'après une utilisation répétée (plusieurs mois) de l'équipement. Il serait donc intéressant d'effectuer ces mêmes mesures chez des chevaux qui seraient montés durant plusieurs semaines avec ce tapis à cales, afin de voir si les paramètres de la locomotion sont franchement modifiés après une utilisation répétée.

Ensuite, les cavaliers montant les quatorze chevaux de notre étude sont des cavaliers très expérimentés. Ils montent près d'une dizaine de chevaux par jour, aux conformations et aux allures différentes. Ils ont donc pu, inconsciemment, compenser le déséquilibre de la selle induit par les cales, et ainsi atténuer l'impact de notre tapis sur la locomotion du cheval. Ceci reste cependant à nuancer, puisque le tapis utilisé n'a pas qu'un effet de « déséquilibre » de la selle, il a également une action de mise sous pression importante des zones concernées (garrot-épaules, ou région lombaire en fonction des cales utilisées), en fonction de la disposition des cales, et le cavalier n'a aucun contrôle sur cette pression exercée par la selle. Ceci expliquerait peut-être aussi pourquoi les seuls résultats quantitatifs significatifs observés sont ceux de l'expérimentation n°2. Il est également possible que le cavalier ait atténué les modifications de nos paramètres quantitatifs mesurés, qui passeraient alors sous notre seuil de détection.

On se doit de rappeler que nos études ne portent respectivement que sur 9 et 5 chevaux, provenant d'un même environnement et travaillés de la même façon. Ceci est principalement dû à des raisons pratiques et logistiques : nous n'avons pas trouvé plus de chevaux répondant aux critères et pouvant être montés par le même cavalier, sur le même sol. Et si cet échantillon nous permet de faire des statistiques cohérentes, et de mesurer l'impact du tapis à cales utilisé, nous gagnerions à réaliser cette étude sur un plus grand nombre de chevaux.

L'étude reposant principalement sur la modélisation d'une selle mal adaptée au dos du cheval, la façon dont est ajustée la selle est très importante pour éviter tout biais dans nos mesures. S'ajoute à cela le fait que, dans notre étude ou de façon plus générale, les conformations des dos des chevaux sont très variables. Ainsi, il devient vite très complexe de réaliser ce genre d'étude avec plusieurs selles car de trop nombreux paramètres sont alors variables, et il est difficile de maîtriser la façon dont la selle va être mal adaptée au cheval. En prenant aussi en compte la question du budget, qui freinait la possibilité d'avoir suffisamment de selles différentes pour réaliser une étude complète, nous avons travaillé avec le tapis développé par la sellerie Maurel et le Dr. Baup. Si ce tapis permettait de déséquilibrer franchement la selle, et d'induire des pressions plus importantes qu'avec une selle ajustée, il restait moins sévère pour le dos du cheval qu'une selle mal coupée. En effet, le tapis est en feutre, une matière ayant des propriétés d'absorption des chocs, et retrouvant sa forme initiale après une utilisation courte. Les matelassures des selles modernes sont généralement en laine ou en fibres synthétiques de Dacron, des matériaux qui se tassent avec le temps, et donnent donc des matelassures assez compactes. L'effet de compression peut ainsi être diminué avec ce tapis.

La façon dont la locomotion a été étudiée peut également être questionnée, avec l'utilisation de ces capteurs précis et fiables.

Le Lameness Locator est un outil qui a des résultats à la fois sensibles, et répétables. En effet, lorsqu'une boiterie artificielle est créée chez un groupe de 55 chevaux, à une intensité de plus en plus forte, le système de capteurs inertiels détecte la boiterie à une intensité plus faible que trois vétérinaires expérimentés dans 58,33% des cas, tandis que les vétérinaires détectent la boiterie à une intensité plus faible dans seulement 8,33% des cas. (McCracken *et al.*, 2012). Pour ce qui est de la répétabilité, une première étude de K. Keegan et al. montrent que pour un examen orthopédique subjectif, 17,1% des cliniciens ne tombaient pas d'accord sur les conclusions de l'examen de boiterie (Keegan *et al.*, 2010). Une seconde étude menée par K. Keegan et al. montre que des chevaux équipés des capteurs Lameness Locator®, présentant une faible boiterie d'un seul membre, et trottés à plusieurs reprises en ligne droite montrent des différences ne dépassant pas 10,2% pour les mesures des paramètres fournis par le capteur (Keegan *et al.*, 2011). Ce système de capteurs inertiels permet donc des examens de locomotion répétables et fiables. Son utilisation pour évaluer objectivement la symétrie de la locomotion a donc été validée, et ces capteurs sont utilisés dans de multiples études s'intéressant aux effets sur la locomotion de différents paramètres (par exemple la tranquillisation, Zhao *et al.*, 2020).

Le deuxième capteur utilisé, le système MS100 de chez Movin'Smart manque pour l'instant d'études permettant d'attester de sa répétabilité. Mais bien que ces capteurs soient fiables, l'analyse de la locomotion par la seule étude des mouvements verticaux de la tête et du bassin a pu être insuffisante. Une étude cinématique par exemple, avec une analyse des mouvements des membres aurait pu apporter d'autres informations intéressantes sur la locomotion du cheval, et peut être détecter des raideurs ou des pertes d'amplitudes qui sont plus difficilement détectables avec notre protocole.

CONCLUSION

Lors de l'exercice, le dos du cheval porte le poids du cavalier et de la selle. Cette dernière, outil indispensable de l'équitation contemporaine, ne doit pas interférer avec la locomotion et la biomécanique du cheval, ni induire des douleurs. L'objectif reste donc d'avoir un cheval capable d'exprimer sa souplesse et son fonctionnement de la même façon lorsqu'il est monté que lorsqu'il est en liberté. À cela s'ajoute le fait qu'il apparaît du devoir du vétérinaire praticien de prévenir au maximum les douleurs dorsales provoquées ou aggravées par la selle, et de sensibiliser les propriétaires et cavalier à ces problématiques.

Avec ce travail qui visait à déterminer l'impact d'une selle mal-adaptée sur la locomotion du cheval, nous n'avons pas pu mettre en évidence d'importantes modifications de la locomotion du cheval lorsque l'équilibre de la selle, ainsi que les pressions exercées par cette dernière étaient modifiés. Seuls certains paramètres d'amplitude et de fréquence de mouvements verticaux d'encolure ont été influencés par les différentes dispositions de la selle, mais ces résultats doivent être interprétés prudemment étant donné qu'ils proviennent d'analyses effectuées à partir d'un algorithme sur lequel nous n'avons aucun recul.

De nombreux points restent à élucider, et l'adaptation de la selle au dos du cheval est un sujet d'actualité, donc de plus en plus étudié. Une analyse de la locomotion réalisée avec un protocole différent et sur un plus grand échantillon pourrait très probablement apporter des résultats supplémentaires, et donc, des réponses intéressantes. Les travaux portant sur l'impact de la selle *in vivo* sont aujourd'hui encore trop peu nombreux pour avoir des données précises sur la dynamique du cheval monté. Ce travail reste donc préliminaire, et invite à initier des recherches visant à améliorer le confort et le bien-être des chevaux montés.

Bibliographie

Bonati, L. (2011) *Étude de l'effet de différents pads sur l'adéquation de la selle au dos du cheval*. Thèse de doctorat vétérinaire, Université Claude Bernard, Lyon1.

Brouard, M. (2000) *Évaluation de l'adéquation selle-dos du cheval par le vétérinaire praticien*. Thèse de doctorat vétérinaire, Faculté de Médecine, Nantes.

Cassiat, G. *et al.* (2004) 'Influence of individual competition level on back kinematics of horses jumping a vertical fence', *Equine Veterinary Journal*, 36(8), pp. 748–753.

Causeret, L. (2019) *Évaluation de l'effet d'une séance de médecine manuelle vétérinaire sur la locomotion du cheval à l'aide du système de capteurs inertiels Lameness Locator*. Thèse de doctorat vétérinaire, Université Claude Bernard Lyon 1.

Clayton, H.M. *et al.* (1999) 'The effects of a rider's mass on ground reaction forces and fetlock kinematics at the trot', *Equine Veterinary Journal. Supplement*, (30), pp. 218–221.

de Cocq, P. *et al.* (2010) 'Vertical forces on the horse's back in sitting and rising trot', *Journal of Biomechanics*, 43(4), pp. 627–631.

de Cocq, P. (2012) 'The biomechanical interaction between horse and rider', *Tsg*.

de Cocq, P., van Weeren, P.R. and Back, W. (2006) 'Saddle pressure measuring: Validity, reliability and power to discriminate between different saddle-fits', *The Veterinary Journal*, 172(2), pp. 265–273.

Denoix, J.M. (1987) *Kinematics of the thoracolumbar spine of the horse during dorsoventral movements: a preliminary report*. ICEEP Publications.

Denoix, J.M. and Pailloux, J.P. (1997) *Approche de la kinesithérapie du cheval*. 2ème édition Maloine, Paris, 291p.

Dinsdale, S.M. (1974) 'Decubitus ulcers: role of pressure and friction in causation', *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 55(4), pp. 147–152.

Faber, M. *et al.* (2000) 'Basic three-dimensional kinematics of the vertebral column of horses walking on a treadmill', *American Journal of Veterinary Research*, 61(4), pp. 399–406.

Faber, M., Johnston, C., *et al.* (2001) 'Basic three-dimensional kinematics of the vertebral column of horses trotting on a treadmill', *American Journal of Veterinary Research*, 62(5), pp. 757–764.

Faber, M., Schamhardt, H., *et al.* (2001) 'Methodology and validity of assessing kinematics of the thoracolumbar vertebral column in horses on the basis of skin-fixated markers', *American Journal of Veterinary Research*, 62(3), pp. 301–306.

- Faber, M. *et al.* (2002) 'Repeatability of back kinematics in horses during treadmill locomotion', *Equine Veterinary Journal*, 34(3), pp. 235–241.
- Feltek, K. (2014) 'Analyse spectrale des signaux chaotiques. Réseaux et télécommunications', p. 130.
- Greve, L. and Dyson, S. (2014) 'Saddle fit and management: An investigation of the association with equine thoracolumbar asymmetries, horse and rider health', *Equine Veterinary Journal*, 47(4), pp. 415–421.
- Harman, J.C. (1995) 'Practical saddle fitting.', *The Equine Athlete*, 8:2(1), pp. 11–138.
- Jeffcott, L.B. and Dalin, G. (1980) 'Natural rigidity of the horse's backbone', *Equine Veterinary Journal*, 12(3), pp. 101–108.
- Jeffcott, L.B., Holmes, M.A. and Townsend, H.G.G. (1999) 'Validity of Saddle Pressure Measurements Using Force- sensing Array Technology—Preliminary Studies', *The Veterinary Journal*, 158(2), pp. 113–119.
- Kato, S. *et al.* (2019) 'Abdominal trunk muscle weakness and its association with chronic low back pain and risk of falling in older women', *BMC musculoskeletal disorders*, 20(1), p. 273.
- Keegan, K.G. *et al.* (2010) 'Repeatability of subjective evaluation of lameness in horses', *Equine Veterinary Journal*, 42(2), pp. 92–97.
- Keegan, K.G. *et al.* (2011) 'Assessment of repeatability of a wireless, inertial sensor-based lameness evaluation system for horses', *American Journal of Veterinary Research*, 72(9), pp. 1156–1163.
- Kosiak, M. (1959) 'Etiology and pathology of ischemic ulcers', *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 40(2), pp. 62–69.
- Kotschwar, A.B., Baltacis, A. and Peham, C. (2010) 'The effects of different saddle pads on forces and pressure distribution beneath a fitting saddle', *Equine Veterinary Journal*, 42(2), pp. 114–118.
- Krouskop, T.A. (1983) 'A synthesis of the factors that contribute to pressure sore formation', *Medical Hypotheses*, 11(2), pp. 255–267.
- Lagarde, J. *et al.* (2005) 'Coordination Dynamics of the Horse~Rider System', *Journal of motor behavior*, 37(6).
- Landis, E.M. (1930) 'Micro-injection studies of capillary blood pressure in human skin', *Heart*, (15), pp. 209–228.
- Latif, S.N. *et al.* (2010) 'Saddle pressure patterns of three different training saddles (normal tree, flexible tree, treeless) in Thoroughbred racehorses at trot and gallop', *Equine Veterinary Journal*, 42(s38), pp. 630–636.
- Licka, T., Peham, C. and Zohmann, E. (2001) 'Range of back movement at trot in horses without back pain', *Equine Veterinary Journal. Supplement*, (33), pp. 150–153.

MacKechnie-Guire, R., Fisher, M. and Pfau, T. (2021) 'Effect of a Half Pad on Pressure Distribution in Sitting Trot and Canter Beneath a Saddle Fitted to Industry Guidelines', *Journal of Equine Veterinary Science*, 96, p. 103-307.

Maral, G. (2003) *Réseaux VSAT. John Wiley et fils*. Available at: z.

McCracken, M.J. *et al.* (2012) 'Comparison of an inertial sensor system of lameness quantification with subjective lameness evaluation', *Equine Veterinary Journal*, 44(6), pp. 652–656.

Peham, C. *et al.* (2001) 'Hindlimb lameness: Clinical judgement versus computerised symmetry measurement', *The Veterinary record*, 148, pp. 750–2.

Peham, C. *et al.* (2004) 'Influence of the rider on the variability of the equine gait', *Human Movement Science*, 23(5), pp. 663–671.

Peham, C. *et al.* (2008) 'Forces acting on the horses back and the stability of the rider in sitting and rising trot - a comparison', *Pferdeheilkunde Equine Medicine*, 24(3), pp. 337–342.

Peham, C. *et al.* (2009) 'A comparison of forces acting on the horse's back and the stability of the rider's seat in different positions at the trot', *Veterinary Journal (London, England: 1997)*, 184(1), pp. 56–59.

Rhodin, M. *et al.* (2018) 'Vertical movement symmetry of the withers in horses with induced forelimb and hindlimb lameness at trot', *Equine Veterinary Journal*, 50(6), pp. 818–824.

Roepstorff, L. *et al.* (2009) 'Kinetics and kinematics of the horse comparing left and right rising trot', *Equine Veterinary Journal*, 41(3), pp. 292–296.

Stubbs, N.C. *et al.* (2006) 'Functional anatomy of the caudal thoracolumbar and lumbosacral spine in the horse', *Equine Veterinary Journal. Supplement*, (36), pp. 393–399.

Terada, K. (2000) 'Comparison of Head Movement and EMG Activity of Muscles between Advanced and Novice Horseback Riders at Different Gaits', *Journal of Equine Science*, 11, pp. 83–90.

Thompson, D. (2005) 'A critical review of the literature on pressure ulcer aetiology', *Journal of Wound Care*, 14(2), pp. 87–90.

Todd, B.A. and Thacker, J.G. (1994) 'Three-dimensional computer model of the human buttock, in vivo.', *Journal of Rehabilitation Research and Development*. 31, 111-119 [Preprint].

Townsend, H.G., Leach, D.H. and Fretz, P.B. (1983) 'Kinematics of the equine thoracolumbar spine', *Equine Veterinary Journal*, 15(2), pp. 117–122.

Turner, T.A. (2009) *Thermography in Equine back pathology. Diagnosis and treatment*. Willey-Blackwell.

Van Weeren, P.R., McGowan, C. and Haussler, K.K. (2010) 'Development of a structural and functional understanding of the equine back', *Equine Veterinary Journal*, 42(s38), pp. 393–400.

Von Peinen, K. *et al.* (2010) 'Relationship between saddle pressure measurements and clinical signs of saddle soreness at the withers', *Equine Veterinary Journal*, 42(s38), pp. 650–653.

Von Scheinitz (1999) 'Thermographic diagnostics in equine back.', *Vet. Clin. North. Am. Equine Practice*.

Zhao J. *et al.*,(2020) 'Tranquilizer effect on the Lyapunov exponents of lame horses', *Heliyon*, 6.

Butet (Page consultée le 21 Février 2022). Site [en ligne].

Adresse URL : <https://eu.butet.fr/fr/>

Saddle Fitting (Page consultée le 3 Mars 2022). Site [en ligne].

Adresse URL : <http://www.saddlefitting.fr/>

Veterinary Thermal Imaging (Page consultée le 13 Février 2022). Site [en ligne].

Adresse URL : <http://www.veterinary-thermal-imaging.com/>

Annexes

Annexe 1 : Agrément du comité d'éthique de VetAgro Sup pour la réalisation de ce travail de thèse

<u>Revue Ethique d'un Projet d'utilisation d'animaux à des fins scientifiques</u>
Comité d'Ethique de VetAgro Sup n°18
Numéro Comité d'Ethique : 2090
Titre du Projet : « Evaluation de l'influence des pressions irrégulières de la selle sur le locomotion du cheval de sport ».
Demandeur : Jonathan Urlacher Responsable de la mise en œuvre en conformité avec l'autorisation : Monika Gangl Etablissement Utilisateur : Pôle Equin- VetAgro Sup- Campus vétérinaire- Date de l'avis : 14/01/2021
<input checked="" type="checkbox"/> Avis Favorable <input type="checkbox"/> Avis Favorable sous réserve de modification de la version proposée (version 2) <input type="checkbox"/> Avis Favorable sous condition d'apporter des réponses aux questions posées <input type="checkbox"/> Avis Non Favorable en l'état
<u>Commentaires :</u> Avis favorable en vous souhaitant que les moyens d'investigation choisis vous permettront d'obtenir des résultats exploitables pour votre thèse. Nous vous suggérons, toutefois, de faire signer un consentement éclairé aux propriétaires des chevaux si vous pensez qu'il y aurait un risque « d'incidents » pendant le test.

Signature du Président : p.o.



Attention : Dès réception de votre dossier en provenance du MESR, il vous sera demandé de faire parvenir au Ministère de la Recherche une version modifiée de votre projet, qui tiendra compte des demandes de modifications qui vous ont été demandées : précisions sur le nombre d'animaux, en particulier.

Annexe 2 : Résultats pour chaque paramètre étudié au cours de la première expérimentation

Résultats première série de mesures

Individu	Test	Condition	Diff_Max_Head_Mean	Diff Max Head SD	Diff Min Head Mean	Diff Min Head SD	Diff Max Pelvis Mean	Diff Max Pelvis SD	Diff Min Pelvis Mean	Diff Min Pelvis SD
Vicky	Ligne_droite	Sans_cales	3,3	4,1	8,1	4,4	-4,9	3,2	-11,6	3,1
Vicky	Cercle_droite	Sans_cales	8,2	6,1	9,9	4,5	-4,6	2,3	-5,6	2,6
Vicky	Cercle_gauche	Sans_cales	3,7	6,4	-3,4	4,4	-5,6	2,9	-15,5	3,1
Vicky	Ligne_droite	Cales_arriere	5,5	3,9	8,1	3,3	-1,7	2,7	-11,2	2,1
Vicky	Cercle_droite	Cales_arriere	9	7,5	13,8	3,7	-5,6	2,9	-4,7	2,8
Vicky	Cercle_gauche	Cales_arriere	6,8	8	-3,2	4,5	-6,3	3,8	-14,6	3,3
Vicky	Ligne_droite	Cales_avant	8,1	5,5	8,9	3,9	-0,7	2,1	-11,1	2,7
Vicky	Cercle_droite	Cales_avant	11,5	5,4	11,8	4,7	-4,5	2,5	-4,8	2,6
Vicky	Cercle_gauche	Cales_avant	4,5	6,9	-4,7	5,2	-5,7	3,1	-14,2	3,5
Vicky	Ligne_droite	Cales_cote	9,3	4,6	7,9	4	0,1	2,9	-11	2,8
Vicky	Cercle_droite	Cales_cote	9,4	4,9	13,5	3,8	-3,7	2,9	-4,4	2,2
Vicky	Cercle_gauche	Cales_cote	9,6	6,2	-1,1	4,5	-7	3,4	-15,6	3,1
Harry	Ligne_droite	Sans_cales	1,8	2,9	12,1	4,6	8,2	1,7	-1,6	2,5
Harry	Cercle_droite	Sans_cales	-2,2	4,7	15,4	6,8	5,2	1,9	0,7	2
Harry	Cercle_gauche	Sans_cales	5,9	4,3	3,1	4,9	12,5	1,9	-6,7	1,7
Harry	Ligne_droite	Cales_arriere	1,8	5,9	16,2	7,9	7,6	1,4	-1,2	3,2
Harry	Cercle_droite	Cales_arriere	-3,2	6,2	19,1	7,5	5,3	2	1,9	1,9
Harry	Cercle_gauche	Cales_arriere	7,5	5,6	4	5,8	11,6	2,3	-6,6	2,2
Harry	Ligne_droite	Cales_avant	-0,7	4	8,7	5,9	9,3	1,3	-2,6	1,8
Harry	Cercle_droite	Cales_avant	-2,7	5	15,3	7,9	6,4	1,9	0,7	1,9
Harry	Cercle_gauche	Cales_avant	7,8	4,7	5,8	5,8	12,8	2	-5,7	2,5
Harry	Ligne_droite	Cales_cote	3	4,1	8,7	4,9	8,7	1,6	-2,6	1,8
Harry	Cercle_droite	Cales_cote	-3,5	4,4	14,9	5,5	5,9	1,8	1,8	1,9
Harry	Cercle_gauche	Cales_cote								
Rouet	Ligne_droite	Sans_cales	-4,2	6,5	-7	8,2	-4,8	6,2	-0,4	4
Rouet	Cercle_droite	Sans_cales	0,7	7,3	-8,3	5,7	-4,5	3,9	-4,1	4,1
Rouet	Cercle_gauche	Sans_cales	1,1	7,5	-1,4	6,5	3,9	3,5	-2,8	3,7
Rouet	Ligne_droite	Cales_arriere	-0,9	6,7	-6	6,8	-1,4	3,9	-1,6	4,6
Rouet	Cercle_droite	Cales_arriere	2,9	5,5	-2,5	4,9	-4,1	4,1	-4,5	3,1
Rouet	Cercle_gauche	Cales_arriere	-1,4	8	6,2	6,2	2,7	3,9	-2,3	3,6
Rouet	Ligne_droite	Cales_avant	2,9	7,4	5,8	5,5	-2,6	3,7	-0,8	3,6
Rouet	Cercle_droite	Cales_avant	4,9	5,9	2,1	5,6	-5,5	4,1	-3,3	3,3
Rouet	Cercle_gauche	Cales_avant	2,4	7,4	10,6	5,4	3,9	3,5	-3,2	3,6
Rouet	Ligne_droite	Cales_cote	6,6	9,2	8,9	7,5	1,6	5	-2,9	3,3
Rouet	Cercle_droite	Cales_cote	6,3	8,6	-2,6	7,2	-3,6	4	2,9	3
Rouet	Cercle_gauche	Cales_cote	3,5	7	13,7	6,4	3,3	4,1	2,4	3,3

Sapho	Ligne_droite	Sans_cales	0,1	13	1,7	9	-5	6,8	4,2	4,2
Sapho	Cercle_droite	Sans_cales	0,6	14,2	5,7	10,9	3,8	2,6	10,2	3,5
Sapho	Cercle_gauche	Sans_cales	5,1	14	-4	10,3	2,3	4,4	-2,7	3,8
Sapho	Ligne_droite	Cales_arriere	-4,5	15,3	-13,7	11,8	5	4,4	-1,3	4,5
Sapho	Cercle_droite	Cales_arriere	-2,3	17,4	6,2	12,3	2,8	2,8	4,9	2,5
Sapho	Cercle_gauche	Cales_arriere	-3,6	12,6	-14,5	9	-8,9	2,8	-5,9	4,1
Sapho	Ligne_droite	Cales_avant	-4,5	18,6	-5,8	8,5	4,9	2,6	0,9	3,7
Sapho	Cercle_droite	Cales_avant	-2,6	11,6	1,1	8,3	4,1	3,1	6,2	3,7
Sapho	Cercle_gauche	Cales_avant	-10,6	10,4	-15,6	8,4	-7,4	3,5	1,5	4,1
Sapho	Ligne_droite	Cales_cote	-12,5	15,8	-6,2	11,8	4,8	3,6	8,2	4,4
Sapho	Cercle_droite	Cales_cote	-10,3	19,7	3,3	16,8	6,8	4,1	14,7	4,7
Sapho	Cercle_gauche	Cales_cote	-7,1	11,3	-19	7,3	-8	3,1	3	5,3
Flora	Ligne_droite	Sans_cales	13	14,8	25,3	18,2	1,1	3	2,2	3,6
Flora	Cercle_droite	Sans_cales	6,5	18,7	-6	16,8	2,3	3,3	0,1	3,5
Flora	Cercle_gauche	Sans_cales	-3,2	16,7	-1,5	11,6	4,2	3	-2,9	3,1
Flora	Ligne_droite	Cales_arriere	4,5	19,2	6,7	15,4	2,1	3,3	-0,6	3,4
Flora	Cercle_droite	Cales_arriere	8,9	15,3	-2,4	12,5	0,9	2,5	1,1	3,2
Flora	Cercle_gauche	Cales_arriere	-4,2	17,3	-7,9	17,1	4,3	3,2	-4,7	3,5
Flora	Ligne_droite	Cales_avant	14,5	15,2	0	20,9	2,5	4,5	0,5	4,7
Flora	Cercle_droite	Cales_avant	12,5	15,6	-5,1	11,1	2,5	3,3	0,6	3,2
Flora	Cercle_gauche	Cales_avant	-1,2	12,8	-4,3	10,1	4,6	2,9	-4,1	3,4
Flora	Ligne_droite	Cales_cote	-0,3	18,2	9,3	13,7	3	3,8	0,8	3,4
Flora	Cercle_droite	Cales_cote	7,4	13,8	5,3	14,7	3	2,6	2,3	2,5
Flora	Cercle_gauche	Cales_cote	-1,3	13,3	-4,4	9,5	3,1	3,1	-3,5	3,6
Prince	Ligne_droite	Sans_cales	0	8,9	-2,1	6,1	-0,3	2,4	-0,7	2,2
Prince	Cercle_droite	Sans_cales	-13,4	14,7	-0,4	8,5	0,4	3,8	3,5	2,9
Prince	Cercle_gauche	Sans_cales	7,6	12,4	-14,1	9,5	1,8	2,5	-2,7	2,9
Prince	Ligne_droite	Cales_arriere	0,4	2,5	1,9	4,7	0	2,1	0,3	3,1
Prince	Cercle_droite	Cales_arriere	-2,2	17,5	6,1	6,2	-2,7	2,8	5,2	3,2
Prince	Cercle_gauche	Cales_arriere	16,4	14,5	-9,3	5,2	0,9	3,3	-1,1	3,6
Prince	Ligne_droite	Cales_avant	0,1	6,7	-1,2	6,8	-2,1	4,3	-0,8	4
Prince	Cercle_droite	Cales_avant	-3,4	14,1	8,6	8,2	-1,7	2,3	5,1	3,2
Prince	Cercle_gauche	Cales_avant	7,4	12,5	-9,4	7,7	1,8	2,8	-1,4	2,4
Prince	Ligne_droite	Cales_cote	0,8	10,4	-0,9	5,9	0,1	2,2	1,3	3,2
Prince	Cercle_droite	Cales_cote	3,2	14,1	8,6	6,4	-3,6	2,5	4,7	2,6
Prince	Cercle_gauche	Cales_cote	12	9,4	-5,2	5,7	1,5	2,7	-0,2	3,2
Daisy	Ligne_droite	Sans_cales	-6,9	9,5	2,1	5,7	2,7	2,8	-2,3	2,4
Daisy	Cercle_droite	Sans_cales	-7,3	10,6	11	8,8	0,5	3,1	0,3	2,9
Daisy	Cercle_gauche	Sans_cales	-3,4	9,2	-1,8	8,7	3,6	2,5	-8	2,9
Daisy	Ligne_droite	Cales_arriere	-4,3	7,1	7,3	4,9	1,5	1,8	-2	3
Daisy	Cercle_droite	Cales_arriere	-4,2	10,2	12,3	8,5	-0,3	3,2	2,4	2,6
Daisy	Cercle_gauche	Cales_arriere	-0,1	9,3	-1,7	7,6	2,1	2,2	-8,9	2,2
Daisy	Ligne_droite	Cales_avant	-1,5	5	8,3	4,5	-0,1	2,3	-3,8	2,6
Daisy	Cercle_droite	Cales_avant	-5,1	9,3	11,9	6,8	0,6	3	-0,1	2
Daisy	Cercle_gauche	Cales_avant	0,4	6,5	0,4	5,6	3,1	2,2	-9,7	2,8
Daisy	Ligne_droite	Cales_cote	-3,8	6	6,5	5,4	0,5	2,8	-2,5	3,6
Daisy	Cercle_droite	Cales_cote	-3,5	6,5	8,2	6,9	-1,2	2,9	3,2	3,1
Daisy	Cercle_gauche	Cales_cote	0	6,2	-2,9	5,9	2,8	2	-9,7	2,7
Eclipse	Ligne_droite	Sans_cales	-1,5	5,8	-3,3	7,4	4,6	2,6	-2,8	3,6
Eclipse	Cercle_droite	Sans_cales	2,4	9,4	-6	8,6	-0,9	2,4	1,8	2,4
Eclipse	Cercle_gauche	Sans_cales	-2,6	9,7	-3,2	9,4	8,5	2,9	-12,7	2,8
Eclipse	Ligne_droite	Cales_arriere	-10,7	6,9	-13,2	6,2	-1,6	2,5	-1	3,1
Eclipse	Cercle_droite	Cales_arriere	-5,3	10,1	-9,9	9,9	-5,6	2,3	6,5	2,7
Eclipse	Cercle_gauche	Cales_arriere	-1	10,3	-3,8	8,1	3,6	2,2	-8,1	2,4
Eclipse	Ligne_droite	Cales_avant	-4,5	6,9	-11,3	6,5	1,4	1,9	-5,7	2,9
Eclipse	Cercle_droite	Cales_avant	0,2	9,2	-4,9	8,2	-2,9	2,5	1,7	2,2
Eclipse	Cercle_gauche	Cales_avant	-7,3	8,1	-5,9	9,4	5,9	2,2	-10,7	2,6
Eclipse	Ligne_droite	Cales_cote	-2,6	8,2	-1,1	8,1	1	2,5	-2,3	4,9
Eclipse	Cercle_droite	Cales_cote	-1,7	10,7	-3,2	10,3	-3,3	2,5	4,4	2,2
Eclipse	Cercle_gauche	Cales_cote	-4,3	10,8	-3,6	6,3	3,5	2,4	-10,3	2,5
Kiss_me	Ligne_droite	Sans_cales	2,9	9,1	-1,6	8,8	4,6	2	4	2,8
Kiss_me	Cercle_droite	Sans_cales	5,6	7,6	-2,3	6,7	3,4	2	10,3	3,3
Kiss_me	Cercle_gauche	Sans_cales	-8,1	8,4	-1	6	3,8	2,2	-3,5	2,8
Kiss_me	Ligne_droite	Cales_arriere	1,7	12	6	17,7	4,6	2,1	4,4	3,4
Kiss_me	Cercle_droite	Cales_arriere	3,5	10,2	-0,1	5,3	3,7	2,5	12,8	5,1
Kiss_me	Cercle_gauche	Cales_arriere	-9,9	8,8	-4,7	8,7	3,9	1,6	-2	2,1
Kiss_me	Ligne_droite	Cales_avant	-4,8	9,6	-5,7	12,2	4,9	1,7	2,9	2,9
Kiss_me	Cercle_droite	Cales_avant	1,2	7	-0,4	5,3	5,5	1,7	10,5	1,7
Kiss_me	Cercle_gauche	Cales_avant	-2,2	11,8	-3,5	8,4	5,3	1,5	-2,3	3,1
Kiss_me	Ligne_droite	Cales_cote	-6,1	12,6	-4,6	13,5	3,7	2	3,3	3,1
Kiss_me	Cercle_droite	Cales_cote	0,2	8,4	-2,4	7	5,3	1,8	10,1	2
Kiss_me	Cercle_gauche	Cales_cote	-9,4	10,9	-3,5	8,7	5,4	1,8	-2,3	2,1

Résultats première série de mesures-1

Individu	Test	Condition	Fréquence prédominante (Hz)	Amplitude moyenne	Amplitude Ecart type	Sym Freq	Var Freq	Sym Amp	Var Amp
Vicky	Ligne_droite	Sans_cales	5,44	2,086172816	0,737324382	1,12	13,43	0,74	34,30
Vicky	Cercle_droite	Sans_cales	5,14	1,989580427	0,791337337	1,36	33,68	0,68	38,22
Vicky	Cercle_gauche	Sans_cales	5,23	2,066198337	0,662967545	1,19	12,74	1,00	16,35
Vicky	Ligne_droite	Cales_arriere	5,31	2,177361306	0,703889905	1,26	24,46	0,73	34,38
Vicky	Cercle_droite	Cales_arriere	5,19	2,170387339	0,786949927	1,24	29,26	0,69	37,84
Vicky	Cercle_gauche	Cales_arriere	5,13	2,245522553	0,549697958	1,12	25,97	0,99	17,98
Vicky	Ligne_droite	Cales_avant	5,20	2,134084302	0,809872927	1,31	28,16	0,72	29,84
Vicky	Cercle_droite	Cales_avant	5,22	2,184746925	0,684583851	1,36	37,00	0,68	37,64
Vicky	Cercle_gauche	Cales_avant	5,25	2,221364419	0,427734957	1,23	15,54	0,97	14,37
Vicky	Ligne_droite	Cales_cote	5,39	2,12883113	0,833880747	1,24	25,46	0,73	32,95
Vicky	Cercle_droite	Cales_cote	5,22	2,158465691	0,747434832	1,29	34,17	0,69	37,88
Vicky	Cercle_gauche	Cales_cote	5,25	2,156843666	0,622722417	1,40	34,61	0,94	19,00
Harry	Ligne_droite	Sans_cales	5,15	1,387156767	0,507880273	1,12	18,08	1,03	39,75
Harry	Cercle_droite	Sans_cales	3,17	1,378228082	0,332292688	1,04	5,31	0,59	51,86
Harry	Cercle_gauche	Sans_cales	5,05	1,454851286	0,244630722	0,88	12,99	1,38	31,80
Harry	Ligne_droite	Cales_arriere	4,93	1,434829712	0,512058039	0,98	38,67	1,49	63,25
Harry	Cercle_droite	Cales_arriere	5,06	1,333438954	0,354622004	1,00	5,25	1,91	55,01
Harry	Cercle_gauche	Cales_arriere	5,04	1,430816322	0,259848964	0,87	15,86	1,56	40,58
Harry	Ligne_droite	Cales_avant	2,94	1,379450564	0,350044944	0,96	8,82	2,06	54,67
Harry	Cercle_droite	Cales_avant	4,75	1,342825138	0,240881839	1,00	7,83	0,59	57,81
Harry	Cercle_gauche	Cales_avant	4,62	1,479513417	0,312016406	0,88	12,93	1,76	52,28
Harry	Ligne_droite	Cales_cote	5,24	1,283771672	0,418936168	0,99	18,75	1,75	55,47
Harry	Cercle_droite	Cales_cote	3,79	1,359967521	0,29039902	1,00	7,81	1,67	44,73
Harry	Cercle_gauche	Cales_cote	4,53	1,437791846	0,296933186	0,89	10,22	1,80	55,28
Rouet	Ligne_droite	Sans_cales	5,30	1,562024568	0,191806753	0,94	7,80	1,31	24,21
Rouet	Cercle_droite	Sans_cales	5,19	1,4796074	0,150987255	1,04	7,17	1,34	27,14
Rouet	Cercle_gauche	Sans_cales	5,17	1,571855469	0,275111982	0,96	9,73	1,41	31,93
Rouet	Ligne_droite	Cales_arriere	5,44	1,660119165	0,22966093	0,91	7,79	1,44	33,17
Rouet	Cercle_droite	Cales_arriere	5,18	1,468879632	0,196687307	1,01	5,09	1,45	35,04
Rouet	Cercle_gauche	Cales_arriere	5,07	1,611249211	0,287574238	0,95	10,57	1,59	45,24
Rouet	Ligne_droite	Cales_avant	5,25	1,591699219	0,302270765	0,96	7,80	1,36	29,12
Rouet	Cercle_droite	Cales_avant	5,14	1,472464844	0,251889776	0,99	5,10	1,59	45,24
Rouet	Cercle_gauche	Cales_avant	5,16	1,609271014	0,254216204	1,02	7,73	1,98	19,57
Rouet	Ligne_droite	Cales_cote	5,25	1,680363582	0,275060693	1,00	5,27	1,03	19,85
Rouet	Cercle_droite	Cales_cote	5,19	1,438238475	0,256024529	1,08	7,78	1,10	18,01
Rouet	Cercle_gauche	Cales_cote	5,13	1,520979256	0,330455306	1,03	8,90	1,11	20,44

Sapho	Ligne_droite	Sans_cales	5,65	1,803605769	0,345487037	1,04	12,05	1,08	16,91
Sapho	Cercle_droite	Sans_cales	5,43	1,71695181	0,354396607	1,10	10,74	0,93	22,95
Sapho	Cercle_gauche	Sans_cales	5,47	1,9095291	0,333044749	0,98	7,53	1,22	26,36
Sapho	Ligne_droite	Cales_arriere	5,74	1,993052809	0,467905663	1,07	13,12	1,36	33,10
Sapho	Cercle_droite	Cales_arriere	5,40	1,744222005	0,319903098	1,08	13,09	0,93	26,27
Sapho	Cercle_gauche	Cales_arriere	5,48	1,894333	0,393995176	0,96	8,28	1,53	37,27
Sapho	Ligne_droite	Cales_avant	5,51	2,158185261	0,427044209	0,98	11,82	1,25	27,15
Sapho	Cercle_droite	Cales_avant	5,47	1,855988104	0,252535425	1,05	13,18	1,02	19,35
Sapho	Cercle_gauche	Cales_avant	5,41	1,921697443	0,463389057	0,90	13,28	1,76	51,50
Sapho	Ligne_droite	Cales_cote	5,71	2,09346147	0,375017843	0,99	14,50	1,36	30,97
Sapho	Cercle_droite	Cales_cote	5,51	1,852561257	0,498473417	0,96	16,08	1,14	33,97
Sapho	Cercle_gauche	Cales_cote	5,51	1,960885647	0,335479699	0,92	10,85	1,76	50,32
Flora	Ligne_droite	Sans_cales	5,37	2,095620764	0,703299159	1,11	16,44	0,71	43,47
Flora	Cercle_droite	Sans_cales	5,33	1,973723493	0,510311319	1,02	13,19	1,16	35,37
Flora	Cercle_gauche	Sans_cales	5,38	2,06687182	0,569731514	1,01	8,27	1,09	25,89
Flora	Ligne_droite	Cales_arriere	5,43	2,282500878	0,6146864	1,03	13,20	1,21	31,90
Flora	Cercle_droite	Cales_arriere	5,37	1,978845021	0,48037713	1,06	8,20	1,08	32,16
Flora	Cercle_gauche	Cales_arriere	5,38	2,089070638	0,527336935	1,00	9,62	1,31	32,69
Flora	Ligne_droite	Cales_avant	5,19	2,140715422	0,593833607	1,16	14,55	1,13	36,05
Flora	Cercle_droite	Cales_avant	5,30	1,89998239	0,40773516	1,05	5,40	1,15	23,52
Flora	Cercle_gauche	Cales_avant	5,33	1,998382848	0,476614785	0,97	7,90	1,06	36,98
Flora	Ligne_droite	Cales_cote	5,48	2,090855549	0,574103053	1,09	10,71	0,94	26,62
Flora	Cercle_droite	Cales_cote	5,05	2,014453125	0,408733651	1,03	5,44	0,98	29,62
Flora	Cercle_gauche	Cales_cote	5,38	2,090892493	0,486011765	1,03	5,41	1,02	23,68
Prince	Ligne_droite	Sans_cales	4,99	1,560579427	0,542360966	1,10	9,51	1,02	21,59
Prince	Cercle_droite	Sans_cales	5,15	1,590707632	0,392425326	1,04	10,54	1,12	27,08
Prince	Cercle_gauche	Sans_cales	5,17	1,588691578	0,393612166	0,99	9,26	1,06	23,51
Prince	Ligne_droite	Cales_arriere	5,14	1,661872864	0,441757283	0,98	5,21	0,86	32,06
Prince	Cercle_droite	Cales_arriere	5,39	1,660532633	0,607502961	1,07	7,99	0,93	25,66
Prince	Cercle_gauche	Cales_arriere	5,32	1,636449569	0,624645899	0,96	10,91	0,86	25,67
Prince	Ligne_droite	Cales_avant	5,20	1,692402087	0,566153878	0,98	8,88	0,96	23,07
Prince	Cercle_droite	Cales_avant	5,25	1,6066352	0,534181803	1,05	15,75	0,93	28,57
Prince	Cercle_gauche	Cales_avant	5,21	1,663504079	0,668487534	0,93	10,49	1,00	25,27
Prince	Ligne_droite	Cales_cote	5,20	1,7320054	0,658943193	0,97	11,73	0,92	18,32
Prince	Cercle_droite	Cales_cote	5,30	1,693874452	0,605423764	1,04	11,42	0,94	24,80
Prince	Cercle_gauche	Cales_cote	5,22	1,727491918	0,487299477	1,00	10,45	0,88	29,09

Daisy	Ligne_droite	Sans_cales	5,18	1,385672433	0,135333877	0,98	8,73	0,87	20,37
Daisy	Cercle_droite	Sans_cales	5,22	1,340090461	0,241259753	1,04	6,56	0,86	38,91
Daisy	Cercle_gauche	Sans_cales	5,07	1,383300781	0,210188954	0,98	5,29	1,59	29,59
Daisy	Ligne_droite	Cales_arriere	5,02	1,335039693	0,263953505	0,99	6,19	0,79	28,38
Daisy	Cercle_droite	Cales_arriere	5,13	1,371981057	0,270409634	1,03	8,06	1,57	37,93
Daisy	Cercle_gauche	Cales_arriere	5,06	1,311401367	0,206131369	0,95	7,75	1,45	33,93
Daisy	Ligne_droite	Cales_avant	4,47	1,446631716	0,237700081	1,06	5,27	0,81	23,20
Daisy	Cercle_droite	Cales_avant	4,89	1,451786341	0,225695653	1,02	5,26	1,46	33,67
Daisy	Cercle_gauche	Cales_avant	4,90	1,399872296	0,223094451	1,04	7,79	0,70	40,07
Daisy	Ligne_droite	Cales_cote	3,75	1,495854216	0,183159012	0,98	8,05	0,91	20,37
Daisy	Cercle_droite	Cales_cote	4,42	1,479249883	0,221557197	0,94	7,99	0,91	22,92
Daisy	Cercle_gauche	Cales_cote	5,05	1,368804431	0,236335871	1,07	5,87	0,73	38,51
Eclipse	Ligne_droite	Sans_cales	5,25	1,421690894	0,126902069	1,07	10,62	1,07	13,94
Eclipse	Cercle_droite	Sans_cales	5,01	1,508669212	0,169856884	1,03	7,81	0,99	20,81
Eclipse	Cercle_gauche	Sans_cales	4,42	1,439493396	0,194167285	0,93	9,87	1,12	19,64
Eclipse	Ligne_droite	Cales_arriere	5,13	1,516212593	0,224719793	0,97	6,28	1,10	22,60
Eclipse	Cercle_droite	Cales_arriere	5,16	1,522766113	0,19174893	1,06	5,12	0,87	24,98
Eclipse	Cercle_gauche	Cales_arriere	4,73	1,531455592	0,196446095	0,94	8,51	1,05	19,26
Eclipse	Ligne_droite	Cales_avant	4,70	1,649208984	0,250179228	1,01	6,23	0,88	18,01
Eclipse	Cercle_droite	Cales_avant	5,02	1,628740329	0,210801951	1,06	7,60	1,07	21,61
Eclipse	Cercle_gauche	Cales_avant	4,23	1,62203881	0,1729533	0,95	7,60	0,90	25,00
Eclipse	Ligne_droite	Cales_cote	5,11	1,58875693	0,204461155	1,03	8,38	1,04	20,19
Eclipse	Cercle_droite	Cales_cote	4,99	1,586035156	0,226730806	1,04	7,61	1,09	22,00
Eclipse	Cercle_gauche	Cales_cote	4,42	1,548455351	0,182770249	0,94	7,63	1,02	19,76
Kiss_me	Ligne_droite	Sans_cales	4,56	2,213143808	0,322091591	1,00	9,76	1,29	23,42
Kiss_me	Cercle_droite	Sans_cales	5,17	2,075359594	0,316989413	0,96	8,05	1,23	16,43
Kiss_me	Cercle_gauche	Sans_cales	5,16	1,953694661	0,373906482	1,01	8,10	1,07	28,30
Kiss_me	Ligne_droite	Cales_arriere	5,04	1,938698509	0,445731947	1,05	9,23	1,15	36,31
Kiss_me	Cercle_droite	Cales_arriere	4,78	1,999519173	0,314175285	0,98	9,10	1,23	40,54
Kiss_me	Cercle_gauche	Cales_arriere	4,54	1,841143872	0,259343445	1,02	2,60	1,35	26,61
Kiss_me	Ligne_droite	Cales_avant	4,97	2,03169307	0,328299248	0,95	8,36	1,34	26,44
Kiss_me	Cercle_droite	Cales_avant	4,31	2,017517719	0,198792385	0,92	7,83	1,03	12,79
Kiss_me	Cercle_gauche	Cales_avant	4,82	1,831470631	0,330001429	1,05	7,81	1,21	25,33
Kiss_me	Ligne_droite	Cales_cote				0,97	7,80	1,55	27,19
Kiss_me	Cercle_droite	Cales_cote	5,11	1,936807999	0,214756286	0,94	7,87	1,08	19,47
Kiss_me	Cercle_gauche	Cales_cote	4,46	1,839085255	0,296990322	1,03	7,83	1,15	24,02

Annexe 3 : Résultats pour chaque paramètre étudié au cours de la deuxième expérimentation

Résultats deuxième série de mesures

Individu	Test	Condition	Diff_Max_Head_Mean	Diff_Max_Head_SD	Diff_Min_Head_Mean	Diff_Min_Head_SD	Diff_Max_Pelvis_Mean	Diff_Max_Pelvis_SD	Diff_Min_Pelvis_Mean	Diff_Min_Pelvis_SD
Colorado	Ligne_droite	Sans_cales	-21,4	19,5	17,1	16,4	3,9	3,6	-1,4	3,3
Colorado	Cercle_droite	Sans_cales	0,3	12	3,8	17,2	4,1	3,3	6,3	3,6
Colorado	Cercle_gauche	Sans_cales	-26,4	15	14,9	10,7	3,7	3,5	-5,8	4,3
Colorado	Ligne_droite	Cales_arriere	-14,8	16,5	22,1	18,4	2,1	3,3	-2,5	3,9
Colorado	Cercle_droite	Cales_arriere	-5,4	22,2	6,2	14,3	3,2	3,1	6,1	4,5
Colorado	Cercle_gauche	Cales_arriere	-19,9	11,3	12,8	9,2	2,3	3	-8,2	4,6
Colorado	Ligne_droite	Cales_avant	-24,4	20,3	17,2	18,7	3,7	3,2	-2,3	3,6
Colorado	Cercle_droite	Cales_avant	-0,2	11,2	1	13,3	5,2	5,2	5,5	4,9
Colorado	Cercle_gauche	Cales_avant	-19,6	11,4	6,6	8,5	2,7	3,1	-8,5	5,3
Colorado	Ligne_droite	Cales_unique	-7,9	16,8	14	13,9	4,4	3,3	-3,4	2,8
Colorado	Cercle_droite	Cales_unique	-1,5	17,2	2,7	9,4	4,5	3,4	5,4	4,8
Colorado	Cercle_gauche	Cales_unique	-12,6	10,7	8,9	8	2,6	2,7	-7,4	5,3
Decibel	Ligne_droite	Sans_cales	-3,5	11,8	8,1	6,8	0,6	3,4	1,2	2,7
Decibel	Cercle_droite	Sans_cales	-3	14	17,5	7,1	-5,5	2,8	11,1	4,5
Decibel	Cercle_gauche	Sans_cales	-4	13,7	-8,4	6,6	5,7	3,2	-6,8	6,1
Decibel	Ligne_droite	Cales_arriere	-4,5	13,3	6,8	7,7	0,8	2,4	-0,2	3,4
Decibel	Cercle_droite	Cales_arriere	-1,8	11,9	15,6	8,1	-5,9	2,8	10	3,9
Decibel	Cercle_gauche	Cales_arriere	-3,5	17,7	-5,4	6,5	5,6	3,4	-6,5	5,5
Decibel	Ligne_droite	Cales_avant	-11,2	13,6	7,5	7,2	1,6	2,8	0,4	3,4
Decibel	Cercle_droite	Cales_avant	-2,9	12,5	19	7,4	-5	3,2	11,6	4,6
Decibel	Cercle_gauche	Cales_avant	-1,2	9,9	-7,7	7,9	5,1	3,8	-6,7	4,5
Decibel	Ligne_droite	Cales_unique	-10,2	10,6	7,4	6,6	1	2,5	1	3,6
Decibel	Cercle_droite	Cales_unique	1,4	13,2	15,7	8,8	-6	3	10,3	4,4
Decibel	Cercle_gauche	Cales_unique	-1,4	14,6	-4,6	8,1	5,4	2,9	-7,7	5,1
Dedicace	Ligne_droite	Sans_cales	-12,7	12	-9,3	12,7	0,1	3,2	5,8	4,1
Dedicace	Cercle_droite	Sans_cales	-17,2	10,2	-1,8	7,7	-2,4	3,4	11,3	3,7
Dedicace	Cercle_gauche	Sans_cales	-8,6	8,3	-0,3	7,2	1,6	2,1	-4,2	3
Dedicace	Ligne_droite	Cales_arriere	-13,8	9,8	-8,9	8,1	-0,8	2,4	4,2	2,7
Dedicace	Cercle_droite	Cales_arriere	-14,2	8,6	-2,2	7,1	-3,5	3,2	9,5	3,7
Dedicace	Cercle_gauche	Cales_arriere	-10,6	7,3	-8,2	7,3	0,3	2,1	-3,6	4,1
Dedicace	Ligne_droite	Cales_avant	-11,8	7,5	-6,3	6,5	-0,5	2,2	3,2	3,3
Dedicace	Cercle_droite	Cales_avant	-12,8	8,7	-3,3	8,6	-3,1	3,2	9	3,5
Dedicace	Cercle_gauche	Cales_avant	-12,2	7,6	-3,1	5,5	1	2,8	-3,7	3,4
Dedicace	Ligne_droite	Cales_unique	-10,5	10,4	-3,8	10,4	-0,9	3	3	2,8
Dedicace	Cercle_droite	Cales_unique	-12,8	7,7	-2,7	6,8	-2,4	2,4	9,1	3,5
Dedicace	Cercle_gauche	Cales_unique	-16,3	8,1	-1,3	7,2	1,6	2,6	-2,7	3,3
Excell	Ligne_droite	Sans_cales	-34,1	16,7	14	20,7	-3,5	3,3	6	2,8
Excell	Cercle_droite	Sans_cales	-22,9	11,2	21,6	9,6	-0,8	3	6,2	4,6
Excell	Cercle_gauche	Sans_cales	-31,6	13,4	9,8	16,8	2,2	2,9	-1,9	2,8
Excell	Ligne_droite	Cales_arriere	-33,1	14	19,5	14,9	1,4	2,4	1,4	2,8
Excell	Cercle_droite	Cales_arriere	-20,9	9	18,2	11,5	2,3	3,2	4,9	3,2
Excell	Cercle_gauche	Cales_arriere	-31	10,7	-4,2	15,8	2,7	3	-3,4	3
Excell	Ligne_droite	Cales_avant	-31,7	12,6	17,7	12,1	2,7	2,8	0,3	2,2
Excell	Cercle_droite	Cales_avant	-22,3	9,2	11,4	13,9	1,5	2,9	2,1	3,1
Excell	Cercle_gauche	Cales_avant	-28,2	10,3	-15,2	12,1	3,7	2,8	-2,3	3,2
Excell	Ligne_droite	Cales_unique	-26,3	11,5	6,9	15	2,8	3,4	2,8	2,8
Excell	Cercle_droite	Cales_unique	-22,4	10,4	18,6	10,5	2,1	3,2	3,8	2,4
Excell	Cercle_gauche	Cales_unique	-31,3	13,7	-2,6	10,1	1	3,2	-2,2	3,1
Prince2	Ligne_droite	Sans_cales	15,5	15,7	11,7	9,6	-2,2	3,5	-6,2	3,4
Prince2	Cercle_droite	Sans_cales	22,1	14,6	9,9	10,2	-2,6	3,2	-6,8	3,5
Prince2	Cercle_gauche	Sans_cales	6,7	14,5	5,5	10,7	-1,4	4,1	-10,2	3,2
Prince2	Ligne_droite	Cales_arriere	27,5	16,9	17,6	9,4	-2,3	2,9	-7,7	3,1
Prince2	Cercle_droite	Cales_arriere	26,4	14	13,8	12,1	-4,6	2,4	-7	3,5
Prince2	Cercle_gauche	Cales_arriere	1,6	16,7	7,8	11,2	-1,7	3,2	-9,7	2,9
Prince2	Ligne_droite	Cales_avant	22,2	18,6	15,8	15	-3,7	3,1	-7,9	3,3
Prince2	Cercle_droite	Cales_avant	24,7	13,8	7,7	12,9	-2,4	3,1	-7,7	3,2
Prince2	Cercle_gauche	Cales_avant	-6,7	15,5	6,4	11,3	-1,4	3,8	-11,2	3,6
Prince2	Ligne_droite	Cales_unique	26,7	15,5	14	11,4	-3,4	3,4	-8,7	4
Prince2	Cercle_droite	Cales_unique	18,3	27,9	9	18,1	-1,6	3	-6,2	3,6
Prince2	Cercle_gauche	Cales_unique	12,7	13,9	9,9	11,2	-1,8	3,4	-9,8	3

Résultats deuxième série de mesures-1

Individu	Test	Condition	Frequence predominante	Amp mean	Amp SD	Sym Freq	Var Freq	Sym Amp	Var Amp
Colorado	Ligne_droite	Sans_cales	5,781593835	1,597004046	0,246639204	0,94	11,4	0,86	33,12
Colorado	Cercle_droite	Sans_cales	5,670895466	1,541893212	0,277907085	0,99	8,47	1,12	30,18
Colorado	Cercle_gauche	Sans_cales	5,507875322	1,531807141	0,282332345	1	8,49	1,21	31,75
Colorado	Ligne_droite	Cales_arriere	6,028892393	1,510528274	0,258652817	0,90	17,05	0,77	37,13
Colorado	Cercle_droite	Cales_arriere	5,800471708	1,631071392	0,241868218	0,99	11,64	1,26	31,25
Colorado	Cercle_gauche	Cales_arriere	5,596367319	1,725964998	0,3033923	1,04	8,77	0,88	26,39
Colorado	Ligne_droite	Cales_avant	5,759788319	1,58199056	0,338744016	0,97	13,88	0,99	34,3
Colorado	Cercle_droite	Cales_avant	5,53847443	1,654050495	0,301252521	0,93	5,7	1,04	30,90
Colorado	Cercle_gauche	Cales_avant	5,535013005	1,679421727	0,260591843	0,98	5,7	0,93	24,95
Colorado	Ligne_droite	Cales_unique	5,861855119	1,656452047	0,281333335	0,99	10,44	0,91	30,85
Colorado	Cercle_droite	Cales_unique	5,59383213	1,736596084	0,276027166	0,94	11,41	1,08	25,56
Colorado	Cercle_gauche	Cales_unique	5,67095739	1,747132049	0,308564137	1,01	8,86	0,94	29,52
Decibel	Ligne_droite	Sans_cales	5,612906196	1,913803711	0,319379294	0,95	10,42	1,01	28,44
Decibel	Cercle_droite	Sans_cales	5,353752049	1,927345646	0,271373685	0,93	10,99	0,92	24,35
Decibel	Cercle_gauche	Sans_cales	5,47532997	2,063119394	0,373364346	0,97	8,16	1,27	31,97
Decibel	Ligne_droite	Cales_arriere	5,760815674	2,207092285	0,403369811	0,96	7,71	0,98	26,05
Decibel	Cercle_droite	Cales_arriere	5,275414915	2,062195709	0,3300671	0,91	8,82	0,91	29,94
Decibel	Cercle_gauche	Cales_arriere	5,411667004	2,23875558	0,460314636	0,98	8,21	1,34	24,11
Decibel	Ligne_droite	Cales_avant	5,66385488	2,217477899	0,457535972	0,97	10,44	1,01	23,27
Decibel	Cercle_droite	Cales_avant	5,213672413	1,937159683	0,338974447	0,88	13,79	1,04	29,05
Decibel	Cercle_gauche	Cales_avant	5,313205297	2,224838257	0,329906228	1	6,93	0,94	29,97
Decibel	Ligne_droite	Cales_unique	5,702032008	2,218862991	0,469766184	0,97	7,60	1,06	27,57
Decibel	Cercle_droite	Cales_unique	5,313366147	2,117763421	0,4530122	0,97	8,24	0,96	27,90
Decibel	Cercle_gauche	Cales_unique	5,411133153	2,238654243	0,380565301	1,01	8,26	1,14	31,88
Dedicace	Ligne_droite	Sans_cales	5,424901827	2,0335165	0,67724405	1,04	17,89	1,24	16,63
Dedicace	Cercle_droite	Sans_cales	5,357474131	1,980995009	0,374911446	0,91	10,56	1,06	21,71
Dedicace	Cercle_gauche	Sans_cales	5,254653319	2,184132228	0,266173732	1,02	9,08	1,06	19,09
Dedicace	Ligne_droite	Cales_arriere	5,545974248	2,06236159	0,482568837	1	18,42	1,28	21,31
Dedicace	Cercle_droite	Cales_arriere	5,305386597	1,979071255	0,259899328	1,01	9,83	1,06	18,06
Dedicace	Cercle_gauche	Cales_arriere	5,319017103	2,040189767	0,287271899	0,97	5,17	1,20	23,40
Dedicace	Ligne_droite	Cales_avant	5,37907475	1,980939716	0,312488057	1	8,49	1,29	20,11
Dedicace	Cercle_droite	Cales_avant	5,328887435	1,99222868	0,225065985	0,93	10,51	1,05	18,87
Dedicace	Cercle_gauche	Cales_avant	5,135964228	1,939990852	0,243388686	1	2,59	1,07	16,12
Dedicace	Ligne_droite	Cales_unique	5,531172195	2,025631636	0,750421632	1,01	16,63	1,20	22,42
Dedicace	Cercle_droite	Cales_unique	5,173298906	2,016229248	0,259405685	0,95	7,65	1,05	15,22
Excell	Ligne_droite	Sans_cales	5,382560347	1,47751034	0,440805095	0,96	18,91	1,01	48,84
Excell	Cercle_droite	Sans_cales	5,082748311	1,510484921	0,315933329	0,94	13,31	1,03	42,68
Excell	Cercle_gauche	Sans_cales	5,277110857	1,359700521	0,221657087	1,01	10,07	1,13	31,84
Excell	Ligne_droite	Cales_arriere	4,691017977	1,537993942	0,291941085	0,96	17,37	0,94	33,50
Excell	Cercle_droite	Cales_arriere	5,04886174	1,584137331	0,280628478	0,96	12,75	0,90	28,28
Excell	Cercle_gauche	Cales_arriere	5,232462174	1,448429988	0,302938836	1,01	13,36	1,12	28,91
Excell	Ligne_droite	Cales_avant	5,232625859	1,430799119	0,252710062	0,94	20,63	0,94	31,68
Excell	Cercle_droite	Cales_avant	5,05916085	1,502663845	0,245595659	1,04	12,62	0,95	36,22
Excell	Cercle_gauche	Cales_avant	5,269556394	1,383388421	0,237115361	1,09	10,37	1,18	39,90
Excell	Ligne_droite	Cales_unique	5,45211108	1,421556405	0,307204424	0,97	14,44	1,04	28,02
Excell	Cercle_droite	Cales_unique	4,850889898	1,375521199	0,277912527	1,03	13,95	0,99	34,75
Excell	Cercle_gauche	Cales_unique	5,205089428	1,385583655	0,258941738	0,97	9,88	1,17	19,27
Prince2	Ligne_droite	Sans_cales	5,427646524	1,485533808	0,356185886	1,07	12,50	0,87	37,68
Prince2	Cercle_droite	Sans_cales	5,244029707	1,524429321	0,360274147	1,05	7,82	0,77	38
Prince2	Cercle_gauche	Sans_cales	5,145691808	1,410180911	0,261927952	1,03	13,03	0,94	20,14
Prince2	Ligne_droite	Cales_arriere	5,489659148	1,447872039	0,379001611	1,16	14,58	0,71	40,86
Prince2	Cercle_droite	Cales_arriere	4,946055399	1,354029338	0,363337047	1,01	12,57	0,99	29,77
Prince2	Cercle_gauche	Cales_arriere	5,201828817	1,374264953	0,317512749	1,02	12,81	0,99	25,43
Prince2	Ligne_droite	Cales_avant	5,060622717	1,373109209	0,400873026	1,1	15,45	0,91	36,81
Prince2	Cercle_droite	Cales_avant	4,408070373	1,506144206	0,283482483	1,03	7,52	1,03	31,69
Prince2	Cercle_gauche	Cales_avant	4,917846843	1,442287401	0,273123291	1,04	13,26	0,88	24,16
Prince2	Ligne_droite	Cales_unique	5,440374781	1,435469954	0,371418429	1,03	15,44	0,88	36,59
Prince2	Cercle_droite	Cales_unique	4,943072687	1,476876395	0,347769775	1,05	12,10	0,85	27,87
Prince2	Cercle_gauche	Cales_unique	5,318305285	1,427791152	0,247301362	1,05	13,25	0,81	29

Annexe 4 : Résultats de l'analyse statistique pour l'expérimentation n°1. Les valeurs significatives (p-value < 0,05) sont colorées en vert

Résultats de l'analyse statistique de l'expérimentation 1

Paramètre testé	p-value pour l'analyse de la condition* seulement	p-value pour l'analyse du test** seulement	p-value pour la condition croisée avec le test
Diff Max Head Mean	0.5307058	0.0003596	0.9431779
Diff Min Head Mean	0.7223177	0.0006132	0.8434838
Diff Max Pelvis Mean	0.8641833	0.0003714	0.9898639
Diff Min Pelvis Mean	0.4459	1.621e-15	0.9902
Fréquence tête prédominante	0.072560	0.009172	0.075482
Amplitude moyenne tête	0.08243	0.004342	0.085466
Amplitude SD tête	0.13462	0.009231	0.055437
Sym Ff	0.6598350	0.0001785	0.3128530
Var Ff	0.8387	0.2801	0.8695
Sym amp	0.2670	0.0233	0.8831
Var amp	0.03441	0.66996	0.59974

*Condition = disposition des cales sur le tapis lors de la mesure en question (sans cales, cales à l'avant, cales à l'arrière, ou cales sur le coté)

**Test = exercice réalisé par le cheval lors de la mesure en question (ligne droite, cercle à droite, ou cercle à gauche)

Annexe 5 : Résultats de l'analyse statistique pour l'expérimentation n°2. Les valeurs significatives (p-value < 0,05) sont colorées en vert

Résultats de l'analyse statistique de l'expérimentation 2

Paramètre testé	p-value pour l'analyse de la condition* seulement	p-value pour l'analyse du test** seulement	p-value pour la condition croisée avec le test
Diff Max Head Mean	0.5307058	0.0003596	0.9431779
Diff Min Head Mean	0.7223177	0.0006132	0.8434838
Diff Max Pelvis Mean	0.8641833	0.0003714	0.9898639
Diff Min Pelvis Mean	0.4459	1.621e-15	0.9902
Fréquence tête prédominante	0.072559	0.008239	0.021236
Amplitude moyenne tête	0.08466	0.004241	0.035489
Amplitude SD tête	0.12256	0.009342	0.041256
Sym Ff	0.97487	0.03321	0.91347
Var Ff	0.5473	8.1e-06	0.9757
Sym amp	0.9587	0.1370	0.4381
Var amp	0.28685	0.02193	0.92879

*Condition = disposition des cales sur le tapis lors de la mesure en question (sans cales, cales à l'avant, cales à l'arrière, ou cales sur le coté)

**Test = exercice réalisé par le cheval lors de la mesure en question (ligne droite, cercle à droite, ou cercle à gauche)

ÉVALUATION DE L'INFLUENCE DES PRESSIONS IRRÉGULIÈRES DE LA SELLE SUR LA LOCOMOTION DU CHEVAL DE SPORT.

Auteur

URLACHER Jonathan

Résumé

Cette thèse porte sur l'adaptation de la selle au dos du cheval de sport, et sur l'influence que peuvent avoir des déséquilibres de la selle ou des pressions exagérées induites par cette dernière sur la locomotion de l'animal.

La première partie est une étude bibliographique de l'anatomie du dos du cheval, ainsi que de sa biomécanique, à la fois « nu » et monté. Cette partie s'intéresse également à la selle et à ses constituants, avant d'étudier la façon dont l'adaptation de la selle au dos du cheval est de nos jours évaluée, puis mise en place.

Une deuxième partie, expérimentale, consiste en l'utilisation d'un tapis équipé de plusieurs cales en feutre, afin d'induire artificiellement des déséquilibres sur une selle initialement adaptée au dos d'un cheval. Pour cela, nous avons équipé des chevaux avec des capteurs de locomotion (les capteurs Lameness Locator de Equinosis, et MS100 de Movin' Smart ont été utilisés) afin d'analyser le déplacement du cheval selon les différentes cales du tapis mises en place. L'étude des différents paramètres fournis par les deux capteurs montre une légère différence dans la locomotion du cheval durant des lignes droites, lorsque ce dernier était monté avec certaines cales. Il reste cependant difficile, au vu du nombre de chevaux utilisés et de la faible valeur absolue de la différence notée, d'affirmer avec certitude qu'un effet réel a été observé. Une expérimentation utilisant d'autres capteurs de locomotion pourrait nous permettre d'y voir plus clair.

Mots-clés

Cheval, Locomotion, Boiterie, Selle, Capteur de mouvement

Jury

Président du jury : Pr **SERVIEN Elvire**

Directeur de thèse : Dr **GANGL Monika**

1er assesseur : Pr **SCHRAMME Michael**

2ème assesseur : Pr **LOUZIER Vanessa**