

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

2020

INFLUENCE DU SOL SUR LA CINÉMATIQUE DE LA LIGNE DU DESSUS CHEZ LE CHEVAL, AU PAS ET AU TROT : COMPARAISON ENTRE LE SABLE ET L'ASPHALTE

THESE

pour le diplôme d'Etat de

DOCTEUR VETERINAIRE

présentée et soutenue publiquement

le 29 octobre 2020

devant

la Faculté de Médecine de Nantes

par

LOUISE THÉSÉ

Né(e) le 07/02/1994 à Le Chesnay (78)

JURY

Président : Monsieur Yves MAUGARS – Professeur à la faculté de Médecine de Nantes

Rapporteur : Madame Caroline TESSIER – Maître de conférences à l'École Nationale Vétérinaire, Agroalimentaire et de l'Alimentation, Nantes Atlantique (Oniris)

Assesseur : Monsieur Claude GUINTARD – Maître de conférences à l'École Nationale Vétérinaire, Agroalimentaire et de l'Alimentation, Nantes Atlantique (Oniris)

Membre invité : Monsieur Sébastien CAURE – Docteur vétérinaire au Centre Hospitalier Vétérinaire Equin de Livet (14)



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

2020

INFLUENCE DU SOL SUR LA CINÉMATIQUE DE LA LIGNE DU DESSUS CHEZ LE CHEVAL, AU PAS ET AU TROT : COMPARAISON ENTRE LE SABLE ET L'ASPHALTE

THESE

pour le diplôme d'Etat de

DOCTEUR VETERINAIRE

présentée et soutenue publiquement

le 29 octobre 2020

devant

la Faculté de Médecine de Nantes

par

LOUISE THÉSÉ

Né(e) le 07/02/1994 à Le Chesnay (78)

JURY

Président : Monsieur Yves MAUGARS – Professeur à la faculté de Médecine de Nantes

Rapporteur : Madame Caroline TESSIER – Maître de conférences à l'École Nationale Vétérinaire, Agroalimentaire et de l'Alimentation, Nantes Atlantique (Oniris)

Assesseur : Monsieur Claude GUINTARD – Maître de conférences à l'École Nationale Vétérinaire, Agroalimentaire et de l'Alimentation, Nantes Atlantique (Oniris)

Membre invité : Monsieur Sébastien CAURE – Docteur vétérinaire au Centre Hospitalier Vétérinaire Equin de Livet (14)



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

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

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

Professeurs émérites : Poncelet

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

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

Remerciements

A Monsieur Yves MAUGARS

Professeur à la faculté de Médecine de Nantes,
Pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de présider mon jury de thèse,
Mes hommages respectueux.

A Madame Caroline TESSIER,

Maître de conférences à ONIRIS,
Pour m'avoir encadrée dans la rédaction de ce travail,
Sincères remerciements.

A Monsieur Claude GUINTARD,

Maître de conférences à ONIRIS,
Pour avoir accepté de participer à mon jury de thèse,
Sincères remerciements.

A Monsieur Sébastien CAURE,

Docteur vétérinaire au Centre Hospitalier Vétérinaire de Livet,
Pour m'avoir guidée au cours de cette thèse et pour votre grande disponibilité,
Sincères remerciements.

Aux docteurs BLANVILLE, CARRO, MALINVAUD, MORTAGNE, VILLEDEY, et DENDA UW

Pour leurs travaux de thèse précédents mon sujet,
Sincères remerciements.

A ma famille, française et britannique,

Mes parents, pour votre soutien indéfectible depuis toujours, votre patience et votre gentillesse, votre écoute et vos précieux conseils. Mon frère, le plus intelligent des nains ; les Pasterfield et les Thésé, vous êtes la famille la plus bienveillante qui soit.

A mes amis des Perrières,

Emma, la personne la plus forte et courageuse que je connaisse. Même si le sort s'est acharné sur toi ces dernières années, tu es restée un vrai rayon de soleil, lumineuse et bienveillante, et tu réussis à mener ton chemin de façon admirable, avec ta partenaire de vie toujours à tes côtés. Je sais combien Ranran t'es précieuse, et cette année loin d'elle sera, à n'en pas douter, une difficile épreuve, mais je sais que tu en sortiras victorieuse. Pour être mon amie de longue date et une vraie belle personne, merci.

Gaëlle, pour les centaines de bons souvenirs de moments passés à tes côtés aux Perrières et ailleurs, merci. J'ai hâte que tu reviennes en Bretagne, que l'on puisse se voir plus souvent. Tu me manques.

Vincent, je garde un souvenir ému des soirées à Vildé-la-Marine, et des sorties à cheval aux Perrières. Je te souhaite le meilleur, à toi et ta petite famille, avec vos jolis projets dans le sud.

Eva, pour nos séances à poney, puis à cheval, nos soirées d'été, nos sorties en concours, et les heures passées ensembles aux écuries, merci. J'ai hâte de te voir en robe de mariée l'été prochain, et de lever mon verre de champagne à la santé des heureux mariés.

Mathilde, brillante et déterminée, je suis admirative de ton parcours, du poney shetland à Thara, du collège à la Fac de Médecine. Je suis très heureuse d'avoir la chance d'être ton amie.

Natasha, je me rappellerais toujours de nos galops endiablés sur la plage à St Su, avec nos deux avions de chasse. J'attends avec impatience ton prochain passage en Bretagne.

Camille, ton parcours est la preuve que le travail et la détermination sont les piliers de la réussite, et que les rêves peuvent devenir réalité si on s'en donne les moyens.

Les anciens monos, Marine, Nahéma, Yaya, Steph, Adeline, Karine et les autres, je garde à jamais dans ma mémoire des souvenirs heureux de cette époque révolue.

Vanessa, pour offrir un cadre magnifique et une ambiance accueillante au sein des Perrières, pour permettre à des gens de grandir autour d'une passion, pour m'avoir mis le pied à l'étrier, et pour m'avoir permis de rencontrer ma fidèle Tata, merci.

Mes amis de prépa,

Zélie, Raphaëlle, Camille, on a souffert en ensemble en première année, et je suis reconnaissante d'avoir pu partager un bout de chemin avec vous ; Etienne, mon coach, pour ton soutien toujours opportun, ton aide pour mes stats sur cette thèse, et tes conseils avisés sur le reste de ma vie ; Youenn, à nos fous rires en cours de maths, et nos discussions interminables au téléphone, tu reviens quand tu veux sur Nantes.

Mes amis de l'école véto,

J'ai eu la chance de rencontrer des personnes merveilleuses depuis la première année, jusqu'aux groupes de clinique en 4^{ème} et 5^{ème} année. Manon et Pauline, deux rayons de soleil, vous faite du monde qui vous entoure un monde meilleur ; Diane et Zoé, merci de m'avoir prêté vos

chevaux à l'occasion depuis la blessure de Tata, j'ai hâte de vous retrouver à la fête des pommes avec Amandine ; Maxence, tu vas manquer à l'équipe du CISCO cette année, je te souhaite le meilleur pour la suite ; Charles et Phiphi, mes co-internes, j'ai hâte de travailler avec vous cette année ; Astrid, Jess, Angé, Clara, Paul, Youssef, et Marie, les internes de l'année dernière, pour nous avoir encadrés avec autant de patience, merci. Ellie, Axelle, Nina, Amandine, Clémence, et tous ceux qui se reconnaîtront.

Mes colocs,

Morgane et Lena avec qui la coloc a commencé, vous êtes et resterez de vraies amies, vous savez me reconforter dans les moments difficiles, mais aussi me dire les choses quand il le faut ; Jeanne, la débrouillarde, toujours les mots justes en toute situation, garante de la bonne ambiance de cette maison ; Rachel, pétillante et enjouée, ta bonne humeur communicative illumine la vie à la maison ; Lukas et Léa, sans vous, le confinement n'aurait pas eu un saveur aussi douce.

Mes amis de Sobidain,

Lolo, qui prend soin au quotidien de mes protégés. Steph, Marie, et Sarah, pour nos discussions poney aux écuries, nos apéros au soleil en été et nos fins de journée frigorifiées en hiver, pour toujours garder un œil bienveillant sur mes loulous quand je ne suis pas là, merci.

Mon amoureux,

Simon, pour m'avoir soutenue tout au long de ce travail de thèse, mais surtout pour me rendre heureuse chaque jour. Grâce à toi, l'année 2020 me paraît aussi douce d'un dimanche avec des huîtres et du vin blanc. Je t'aime.

Mon chien,

Malicette, ma brave petite loupotte, la mascotte de la coloc. Tu es véritablement le chien le plus gentil du monde, à défaut d'être le plus sage.

Mes chevaux,

Jaccio, dit Jack Jack, le dernier arrivé dans la famille. Tu auras eu une première année de vie compliquée, et tu m'en as fait voir de toutes les couleurs. Promis mon grand, je ferais tout mon possible pour te voir continuer à grandir et devenir mon beau et gentil cheval.

Niquita, ma Princesse, à mes côtés depuis un peu plus de 9 ans, et autant que je suis aux tiens. Ton arrivée a littéralement tout changé, et c'est grâce à toi que je deviens vétérinaire aujourd'hui, car chaque décision quant à mon avenir a, depuis le début, été étroitement liée à toi. Quand j'y réfléchis, je me rends compte à quel point tu as forgé mon parcours de vie jusqu'à en arriver où nous en sommes aujourd'hui. Je t'ai emmenée avec moi autant que je t'ai suivie dans nos déménagements respectifs. Je te promets de profiter toujours plus des cadeaux que sont chaque heure, chaque minute, chaque moment que je passe à tes côtés, et les savourer comme autant de petites éternités.

Table des matières

Table des figures.....	Erreur ! Signet non défini.
Introduction.....	21
PARTIE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	23
I. RAPPELS D'ANATOMIE DE L'ENCOLURE ET DU DOS	23
I.A. LES STRUCTURES OSSEUSES ET LES ARTICULATIONS.....	23
I.A.1. ANATOMIE GENERALE D'UNE VERTEBRE.....	24
I.A.2. PARTICULARITES DES VERTEBRES CERVICALES.....	24
I.A.3. PARTICULARITES DES VERTEBRES THORACIQUES.....	25
I.A.4. PARTICULARITES DES VERTEBRES LOMBAIRES	26
I.A.5. PARTICULARITES DES VERTEBRES SACREES	26
I.A.6. LE PELVIS	27
I.B. LES TISSUS MOUS.....	28
I.B.1. LES MUSCLES.....	28
I.B.1.1. LES MUSCLES DE L'ENCOLURE.....	28
I.B.1.2. LES MUSCLES DU TRONC.....	34
I.B.2. LES LIGAMENTS	38
II. BIOMECANIQUE DE LA LIGNE DU DESSUS DU CHEVAL.....	41
II.A. MOUVEMENTS ET MODELES BIOMECANIQUES APPLICABLES AU DOS DU CHEVAL	41
II.A.1. DEFINITION DES MOUVEMENTS ELEMENTAIRES.....	41
II.A.2. MODELE DU BOW AND STRING	43
II.A.3. ACTIVITE MUSCULAIRE ET BRAS DE LEVIER	45
II.A.4. STRUCTURE IMPLIQUEES DANS LES MOUVEMENTS DU DOS DU CHEVAL	45
II.A.4.1. L'EXTENSION DE LA COLONNE VERTEBRALE.....	45
II.A.4.2. LA FLEXION DE LA COLONNE VERTEBRALE	46
II.A.4.3. LA LATEROFLEXION DE LA COLONNE VERTEBRALE.....	46
II.A.4.3. LA ROTATION AXIALE DE LA COLONNE VERTEBRALE.....	46
II.B. LES ALLURES	47
II.B.1. NOTION D'ALLURE ET DE FOULEE	47
II.B.2. LE PAS.....	48
II.B.2.1. MECANISME DU PAS	48
II.B.2.2. BIOMECANIQUE DU DOS AU PAS.....	48
II.B.3. LE TROT.....	51
II.B.3.1. MECANISME DU TROT.....	51
II.B.3.2. BIOMECANIQUE DU DOS AU TROT	51
II.B.4. LE GALOP	54

II.B.3.2. MECANISME DU GALOP	54
II.B.3.2. BIOMECHANIQUE DU DOS AU GALOP	55
III. METHODES D'ETUDE DE LA LOCOMOTION DU CHEVAL	57
III.A. LA METHODE CINEMATIQUE.....	57
III.A.1. ANALYSE EN DEUX OU TROIS DIMENSIONS	57
III.A.2. CHOIX ET UTILISATION DES MARQUEURS.....	58
III.A.2.1. Marqueurs cutanés	58
III.A.2.2. Marqueurs fixés aux os	59
III.A.2.3. Utilisation d'émetteurs ultrasons	59
III.A.2.4. Utilisation de photodiodes.....	60
III.A.3. VALIDITE DES DONNEES OBTENUES.....	60
III.B. METHODE CINETIQUE	61
III.B.1. ANALYSE DE LA FORCE DE REACTION DU SOL.....	61
III.B.1.1. Utilisation d'une plateforme de force.....	61
III.B.1.2. Utilisation de capteurs intégrés aux fers.....	61
III.B.2. L'ACCELEROMETRIE.....	62
III.B.3. ELECTROMYOGRAPHIE.....	63
IV. INFLUENCE DU SOL SUR LA LOCOMOTION DU CHEVAL.....	64
IV.A. ETUDE DE LA LOCOMOTION SUR TAPIS ROULANT	64
IV.B. EFFETS BIOMECHANIQUES DES SOLS SUR L'APPAREIL LOCOMOTEUR DU CHEVAL	65
IV.B.1. IMPORTANCE DE LA PISTE	65
IV.B.1.1. STRUCTURE DE LA PISTE	65
IV.B.1.2. IMPORTANCE DE LA PREPARATION DE LA PISTE	65
IV.B.1.3. IMPORTANCE DE LA TENEUR EN EAU DU SABLE	66
IV.B.2. LES INTERACTIONS ENTRE PIED DU CHEVAL ET SOL AU COURS DE LA LOCOMOTION	67
IV.B.2.1. NOTION DE SURFACE PORTANTE.....	67
IV.B.2.2. EFFET DU SOL A L'IMPACT	68
IV.B.2.3. EFFET DU SOL AU FREINAGE	69
IV.B.2.4. EFFET DU SOL SUR L'EXTENSION DES ARTICULATIONS INTERMEDIAIRES.....	70
IV.B.2.5. EFFET DU SOL SUR LA MISE EN CHARGE VERTICALE MAXIMALE	70
IV.B.2.6. EFFET DU SOL SUR LA PROPULSION.....	70
IV.B.2.7. EFFET DU SOL SUR LE DECOLLEMENT DES TALONS.....	71
V. INFLUENCE DES FACTEURS EXTRINSEQUES SUR LA LOCOMOTION DORSALE DU CHEVAL.....	72
V. A. INFLUENCE DU POIDS DU CAVALIER.....	72
V. B. INFLUENCE DES BOITERIES ET DORSALGIES.....	73
V. C. INFLUENCE DE LA FERRURE.....	73

PARTIE II : ETUDE EXPERIMENTALE	75
I. OBJECTIFS DE L'ETUDE	75
II. MATERIEL ET METHODE	76
II. A. EXPERIMENTATION	76
II. A. 1. LES CHEVAUX.....	76
II.A.2. POSITIONNEMENT DES MARQUEURS	77
II.A.3. LE TERRAIN	79
II.A.4. LES PASSAGES.....	79
II.A.5. DESCRIPTION DE LA TECHNIQUE D'ENREGISTREMENT ET ACQUISITION DES DONNEES ...	80
II.A.5.1. CALCUL DE LA VITESSE LORS DES PASSAGES	80
II.A.5.2. DETERMINATION DES PHASES DE LA FOULEE.....	80
II.A.5.3. POINTAGE DES MARQUEURS	82
II.A.5.4. PRESENTATION DU JEU DE DONNEES	82
II.B. EXPLOITATION DES DONNEES	83
II.B.1. OBTENTION DES VALEURS D'ANGLES DORSAUX D'EXTENSION.....	83
II.B.2. ANALYSE STATISTIQUE	84
II.C. RESULTATS.....	84
II.C.1. RESULTATS AU PAS.....	84
II.C.1.1. Résultats pour les grands angles dorsaux	84
II.C.1.2. Résultats pour les petits angles dorsaux d'extension	85
II.C.1.3. Bilan des résultats de la cinématique de la ligne du dessus au pas	86
II.C.2. RESULTATS AU TROT	87
II.C.2.1. Résultats pour les grands angles dorsaux	87
II.C.2.2. Résultats pour les petits angles dorsaux	87
II.C.2.2. Bilan des résultats de la cinématique de la ligne du dessus au trot	88
III.B.6. SCHEMAS D'INTERPRETATION	89
III. DISCUSSION	93
III.A. VALIDITE DU PROTOCOLE EXPERIMENTAL	93
III.A.1. SELECTION DES PASSAGES ETUDIES.....	93
III.A.2. CHOIX DE LA POPULATION DE CHEVAUX ETUDIEE	93
III.A.2.1. EFFECTIF DE LA POPULATION D'ETUDE	93
III.A.2.2. REPRESENTATIVITE DES CHEVAUX ETUDIES	93
III.A.2.3. REPRESENTATIVITE DE LA FERRURE ETUDIEE	94
III.A.3. REPRESENTATIVITE DES TERRAINS ETUDIES	94
III.A.4. ACQUISITION DES IMAGES	95
III.A.4.1. METHODE DE CAPTURE OPTIQUE.....	95

III.A.4.2. ANALYSE BIDIMENSIONNELLE.....	95
III.A.4.3. CHOIX DE LA NATURE ET DU POSITIONNEMENT DES MARQUEURS	95
III.A.4.4. POINTAGE DES MARQUEURS	96
III.A.4.5. DETERMINATION DES DIFFERENTES PHASES DE LA FOULEE	97
III.A.5. ANALYSE STATISTIQUE DES DONNEES	97
III.B. INTERPRETATION DES RESULTATS	98
III.B.1. COMPARAISON DES MOYENNES DES ANGLES SUR SABLE AUX DONNEES DE LA BIBLIOGRAPHIE.....	98
III.B.2. COMPARAISON DES DONNEES A DROITE ET A GAUCHE.....	98
III.B.3. PHASE DE FREINAGE ET LIGNE DU DESSUS	99
III.B.4. PARAMETRES DE LA FOULEE	99
III.B.5. ONDULATIONS DE LA LIGNE DU DOS	99
CONCLUSION	101
Bibliographie.....	102

Table des figures

Figure 1 : Os de la colonne vertébrale et des côtes. D'après (Raynor, 2006).....	23
Figure 2 : Exemple de la troisième vertèbre lombaire du cheval en vue crâniale. (1) Tête de la vertèbre, (3) Foramen vertébral, (4) Processus épineux, (5) Processus transverse, (6) Processus mamillaire, (7) Processus articulaire crânial. D'après (Raynor, 2006)	24
Figure 3 : Vertèbres cervicales du cheval en vue latérale gauche, d'après (Barone, 1976)	25
Figure 4 : Vertèbres thoraciques du cheval en vue latérale gauche, d'après (Barone, 1976) .	25
Figure 5 : Vertèbres lombaires du cheval en vue latérale gauche, d'après (Barone, 1976)	26
Figure 6 : Os sacrum du cheval en vue latérale gauche, d'après (Barone, 1976).....	27
Figure 7: Bassin osseux du cheval en vue dorsale, d'après (Barone, 1976).....	27
Figure 8: Muscles superficiels de l'encolure du cheval, d'après (Barone, 1980)	30
Figure 9 : Muscles Dorsaux du cou du cheval, deuxième plan, vue latérale gauche, d'après (Barone, 1980).....	31
Figure 10 : Muscles ventraux de l'encolure du cheval, d'après (Barone, 1980)	33
Figure 11: Les muscles superficiels du tronc du cheval en vue latérale gauche d'après (Barone, 1980).....	35
Figure 12: muscles du thorax et de l'abdomen, plan des muscles dentelés ventraux et oblique externe de l'abdomen, d'après (Barone, 1980)	36
Figure 13 : Ligament nuchal du cheval en vue latérale gauche, d'après (Barone, 1980)	39
Figure 14: Articulation sacro-illiaque du cheval et ses ligaments, d'après (Barone, 1980).....	40
Figure 15 : Mouvements élémentaires du dos du cheval (A : flexion/extension, B : latéroflexion, C : rotation axiale) d'après (Townsend et al., 1983).....	41
Figure 16: Mouvements élémentaires d'une vertèbre dans un repère orthogonal (x, y, z), d'après (Townsend et al., 1983)	41
Figure 17 : Interdépendance des mouvements de latéroflexion et de rotation axiale sur une portion du rachis du cheval. D'après (Hodgson et al, 2014)	42
Figure 18 : Modélisation du dos du cheval en « bow and string » telle que décrite par Slijper, d'après (Van weeren et al., 2010)	43
Figure 19 : Effets de mouvements de la tête et de l'encolure sur la flexion et l'extension thoraco-lombaire. A : Un abaissement de la tête va fléchir le dos. B : Une élévation de la tête va entraîner une extension du dos. D'après (Hodgson et al., 2014).	44
Figure 20 : Facteurs influençant la flexion ou l'extension du dos dans le modèle « bow and string ». Les flèches pointant vers le haut indiquent un effet d'extension et celles pointant vers le bas une flexion. D'après (Villedéy, 2018)	44

Figure 21 : Décomposition du mécanisme du pas. Les empreintes sont représentées en trait plein lorsque le membre est à l'appui, en trait discontinu lorsqu'il est au soutien. D'après (FFE, 1994).....	48
Figure 22 : Mouvements de flexion-extension (à gauche), de latéroflexion (au milieu) et de rotation axiale (à droite) des vertèbres T10, L1 et S3 pendant une foulée complète de pas sur tapis roulant. Le début de la foulée correspond au poser du pied postérieur gauche. Les barres pleines sous les graphiques indiquent les phases d'appui de chaque membre (LH = postérieur gauche, LF = antérieur gauche, RH = postérieur droit, RF = antérieur droit). D'après (Faber, Johnston, et al., 2001)	49
Figure 23 : Décomposition du mécanisme du trot. Les empreintes sont représentées en trait plein lorsque le membre est à l'appui, en trait discontinu lorsqu'il est au soutien. D'après (FFE, 1994).....	51
Figure 24 : Mouvements angulaires vertébraux moyens pour des chevaux au trot sur un tapis roulant (à 4 m/s) pendant une foulée complète. Le cycle de foulée commence au contact du sabot du postérieur gauche, les barres noires indiquent la phase d'appui. Ligne continue : T10, ligne en tirets : L1, ligne en pointillés : S3. D'après (Faber, Johnston, et al., 2001)	51
Figure 25: Mouvements de flexion-extension dorsale d'un cheval sain au trot. Ligne fine : angle thoracique, ligne épaisse : angle thoraco-lombaire, ligne pointillée : angle lombo-sacré. D'après (Audigié et al., 1999)	52
Figure 26 : Représentation schématique simplifiée de la latéroflexion du dos en fonction du poser des bipèdes diagonaux au trot. L'incurvation du rachis a été exagérée dans un but didactique. Les points représentent les pieds à l'appui, les cercles les pieds au soutien. Le rachis est matérialisé par le trait bleu, le bipède diagonal gauche par les cercles et les points orange, le bipède diagonal droit par les points et les cercles violets. D'après (Chenot-Hervillard, 2015).....	53
Figure 27: Représentation schématique simplifiée de la rotation du rachis en vue caudale selon la position des bipèdes diagonaux d'un cheval a. à l'arrêt sur une surface plane b. au trot en ligne droite sur une surface plane. Le schéma passe par une coupe transversale imaginaire, dans l'axe des membres pelviens. La mise au soutien du membre pelvien provoque la rotation de la partie caudale du rachis ; la mise au soutien du membre antérieur provoque la rotation en sens inverse de la partie crâniale du rachis. Les points représentent les pieds à l'appui, les cercles les pieds au soutien. La partie caudale du rachis est matérialisée par le trapèze bleu clair, la partie crâniale du rachis par le trapèze bleu foncé, le bipède diagonal gauche par les cercles et les points orange, le bipède diagonal droit par les points et les cercles violets. Les proportions ne sont pas respectées. D'après (Chenot-Hervillard, 2015).....	53
Figure 28 : Décomposition du mécanisme du galop à gauche. Les empreintes sont représentées en trait plein lorsque le membre est à l'appui, en trait discontinu lorsqu'il est au soutien. D'après (FFE, 1994).....	54
Figure 29 : Mouvements angulaires au galop (7,3m/s) sur une foulée. Ligne continue : angle thoracique en T10 ; ligne pointillée : angle lombo-sacré en S3 ; ligne en tirets : angle thoraco-	

lombaire en L1. « FE angle » : angle de flexion-extension ; « LB angle » : latéoflexion ; « AR angle » : rotation axiale. D'après (M Faber et al., 2001).....	56
Figure 30 : Marqueurs cutanés sphériques réflecteurs de lumière infrarouge de 19 mm de diamètre utilisés pour une étude de la cinématique de la ligne du dos du cheval. Source (Gómez Álvarez, L'Ami, et al., 2008)	58
Figure 31 : Emplacements des marqueurs les plus communément employés lors d'étude cinématiques. Source (H. M. Clayton & Schamhardt, 2001)	58
Figure 32: Photographie d'un cheval équipé de marqueurs cinématiques invasifs sur un tapis roulant, avec des émetteurs à ultrasons. Encart : Quatre triades de marqueurs apposées sur l'extrémité des broches intracorticales. Source (Chateau et al., 2006).....	60
Figure 33: Photographie d'un fer dynamométrique utilisé dans une étude de la locomotion du cheval. (Chateau et al., 2010).....	62
Figure 34 : Positionnement d'un accéléromètre sur la paroi d'un sabot. (Chateau et al., 2010)	62
Figure 35 : Exemple représentatif de la pression totale enregistrée sur une plaque de pression pendant une foulée complète sur le membre antérieur gauche d'un poney au pas sur sol dur (a) et sur sol souple (b). La distribution de la pression exercée est indiquée par une couleur bleue en cas de pression faible et en rouge en cas de pression importante. Chaque pixel correspond à un capteur de pression. D'après ((Oosterlinck et al., 2014)).....	67
Figure 36 : Schéma explicatif de l'influence du sol sur la surface portante du pied, d'après (Parks, 2012).....	67
Figure 37 : (Gauche) Force et accélération mesurées sous le pied d'un trotteur à 40 km/h, sur une piste souple. Les composantes longitudinale (X) et verticale (Z) de la force et de l'accélération sont tracées séparément, en fonction du temps.	69
Figure 38 : Exemple de mouvement angulaire de flexion-extension au niveau de L3 au trot. Comparaison entre le trot sans cavalier (ligne pointillée), le trot enlevé (croix) et le trot assis (cercles). (de Cocq et al., 2009).....	72
Figure 39 : Ferrures standard utilisées lors des passages étudiés. A : Fer standard en aluminium aux antérieurs. B : Fer standard en acier aux postérieurs. (Photographies de P. Doffemont).....	76
Figure 40 : Position des marqueurs réfléchissant sur les chevaux de l'étude avant et après traitement informatique via tpsDig2w32. (Photo P.Doffemont).....	77
Figure 41 : Exemple d'angle repéré grâce aux marqueurs anatomiques : angle formé entre le segment passant par C3-C6 et celui passant par C6-T6.....	77
Figure 42 : Terrains étudiés. A: couloir en sable de carrière. B: couloir d'asphalte. (Photo P.Doffemont).....	79
Figure 43 : Captures d'écran du calcul de vitesse. A : 1'16''00. B : 1'31''40. $V = 15,40/2,4 = 1,55$ m/s. (Blanville).....	80

Figure 44: Cycle d'une foulée avec les noms des différentes phases étudiées (schéma de Cyprien Bole)	81
Figure 45 : Exemples d'images d'une demi-foulée de trot à analyser lorsque les images des dernières phases ne montrent pas tous les marqueurs.	81
Figure 46 : Présentation du tableau de données	82
Figure 47 : Exemple de grand angle d'extension à partir des marqueurs extraits avec le logiciel tpsDig2w32 : angle lombo-sacré.....	83
Figure 48 : Schématisation du cheval l'aide des marqueurs utilisés dans l'expérience (crédit S.Caure)	89
Figure 49 : Modifications des angles dorsaux au pas sur sol dur par rapport au sol souple (Crédit S. Caure)	90
Figure 50 : Modifications des angles dorsaux au trot sur sol dur par rapport au sol souple (Crédit S. Caure)	91

Table des tableaux

Tableau I : Liste des marqueurs placés dans l'étude.....	78
Tableau II : Analyse statistique pour la validité du repérage manuel des marqueurs sur la vidéographie (Villedéy, 2018).	82
Tableau III : Résultats des grands angles au pas sur sable versus asphalte.....	84
Tableau IV : Résultats des petits angles au pas selon le sol, sable versus asphalte	85
Tableau V : Résultats des grands angles au trot	87
Tableau VI : Résultats des petits angles au trot selon le sol, sable versus asphalte.....	87

Introduction

L'incidence élevée des atteintes locomotrices chez les chevaux et les conséquences économiques qu'elles peuvent susciter font de leur gestion un enjeu majeur dans la filière équine. Ces affections ont été largement étudiées, et les progrès techniques en matière d'imagerie ont permis d'améliorer grandement la précision du diagnostic lors de boiteries. Les connaissances acquises en matière de biomécanique du cheval sont une aide précieuse pour expliquer l'apparition de boiteries, et revêtent une importance particulière dans les protocoles de rééducations du cheval convalescent. Ainsi, de nombreuses études ont été menées afin de comprendre les mécanismes qui régissent la locomotion précise du cheval et les facteurs qui sont susceptibles de l'influencer.

Parmi les nombreuses techniques d'analyse des allures, la cinématique est l'une des plus utilisées. Les études cinématiques sont le plus souvent réalisées sur sol dur ou sur tapis roulant. Les chevaux de sport et de course sont pourtant amenés à travailler sur des pistes souples, ce qui pourrait engendrer des modifications de la locomotion. Pour répondre à cette problématique, des études visant à déterminer l'influence du sol sur la locomotion du cheval ont été menées. Elles portaient en majorité sur les changements observés au niveau des portions distales des membres. Les apports de ces études aux connaissances générales d'orthopédie équine ont permis d'adapter des protocoles de rééducation après blessure en fonction des contraintes auxquelles les membres sont soumis.

A ce jour, il existe peu d'études portant sur les facteurs influençant les mouvements de ligne du dos du cheval. Pourtant, il existe un lien étroit entre la locomotion dorsale et celle des membres, comme peuvent en témoigner les études de Landman et al en 2004 et de Gomez Alvarez et al en 2008. Dans ces études, il a été mis en évidence que la moindre boiterie a un effet significatif sur la cinématique de la région thoraco-lombaire (Gómez Álvarez, Bobbert, Lamers, Johnston, Back, & Van Weeren, 2008). De plus, environ un quart des chevaux présentés pour problème locomoteur présentaient simultanément une boiterie et une douleur du dos, et qu'un peu moins de la moitié des chevaux souffrant de douleur thoraco-lombaire ou sacro-iliaque présentent une boiterie des membres antérieurs et postérieurs (Landman et al., 2004).

Etant donnée la relation étroite entre le fonctionnement des membres et celui de la ligne du dessus du cheval, et les conséquences biomécaniques du sol sur les membres, une question se pose : le facteur sol impacte-t-il également la cinématique de la ligne du dessus, et si oui de quelle façon ? A ce jour, peu d'études se sont intéressées à cette question.

Notre étude fait partie d'un projet de recherche global sur l'influence du sol et de la ferrure sur la locomotion du cheval au pas et au trot. Des études précédentes reposant sur le même protocole expérimental ont montré l'influence du sable et de l'asphalte sur les portions proximales et distales des membres du cheval, au pas et au trot, grâce à une analyse cinématique. La présente étude portera sur l'influence du sable et de l'asphalte sur la ligne du dessus du cheval ferré au pas et au trot. L'hypothèse est que le sol influence significativement les angles de flexion et d'extension de la ligne du dessus dans ces conditions.

Dans une première partie, nous présenterons l'anatomie, la biomécanique et la cinématique de l'encolure et du dos du cheval. L'influence connue du sol sur la locomotion du cheval y sera ensuite décrite. La seconde partie présente l'étude expérimentale, avec la description du protocole et les résultats. La discussion qui suit interprète les résultats au regard des connaissances actuelles et expose les intérêts et limites de l'étude.

PARTIE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I. RAPPELS D'ANATOMIE DE L'ENCOLURE ET DU DOS

I.A. LES STRUCTURES OSSEUSES ET LES ARTICULATIONS

Le squelette du dos et de l'encolure est constitué de la colonne vertébrale, aussi appelée rachis. Chez le cheval, elle est composée de (Pilliner et al., 2009) :

- Sept vertèbres cervicales, (A)
- Dix-huit vertèbres thoraciques, (B)
- Six vertèbres lombaires, (C)
- Cinq vertèbres sacrées, (D)
- Quinze à vingt et une vertèbres coccygiennes. (E)

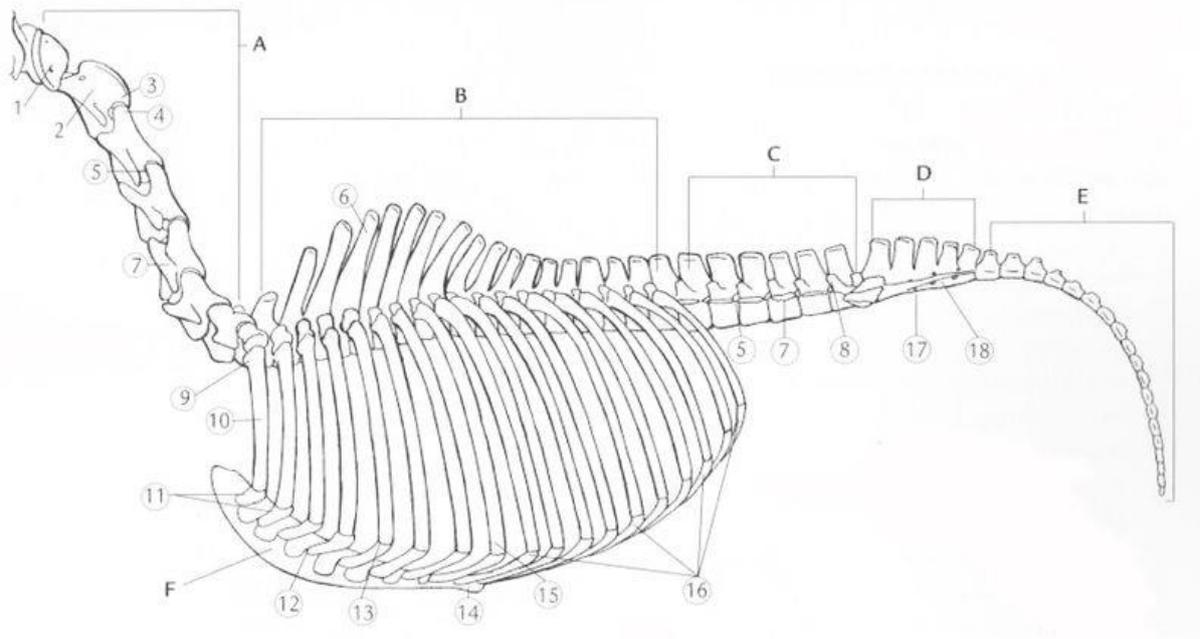


Figure 1 : Os de la colonne vertébrale et des côtes. D'après (Raynor, 2006)

Certains chevaux présentent des vertèbres de transition, qui partagent les caractéristiques morphologiques de deux régions adjacentes, en particulier au niveau de leurs processus. La vertèbre de transition la plus observée est la septième vertèbre cervicale, qui possède souvent un processus épineux plus marqué que celui des vertèbres cervicales précédentes (Henson, 2009).

Par la suite, les vertèbres seront désignées par une lettre et un chiffre correspondant au type de vertèbre et à sa position. Par exemple : T1 désignera la première vertèbre thoracique.

I.A.1. ANATOMIE GENERALE D'UNE VERTEBRE

Une vertèbre est constituée des éléments suivants :

- Un **corps**, convexe crânialement, concave caudalement, qui comporte des zones d'insertion des tissus mous (muscles, fascias).
- Un **canal vertébral**, où passe la moelle épinière.
- Un **processus épineux**, dorsalement au corps vertébral.
- Deux **processus transverses**, latéralement au corps vertébral.
- Des **surfaces articulaires** qui participent aux articulations intervertébrales.

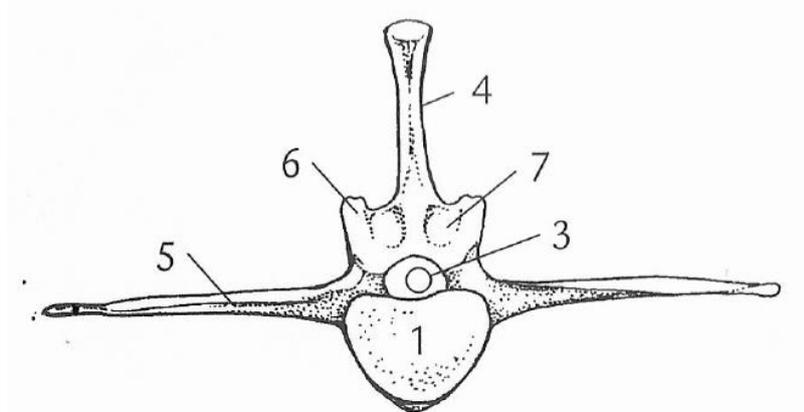


Figure 2 : Exemple de la troisième vertèbre lombaire du cheval en vue crâniale. (1) Tête de la vertèbre, (3) Foramen vertébral, (4) Processus épineux, (5) Processus transverse, (6) Processus mamillaire, (7) Processus articulaire crânial. D'après (Raynor, 2006)

Les proportions respectives et la forme de ces éléments varie selon la portion du rachis. Les corps vertébraux sont séparés entre eux par un disque intervertébral, constitué de matériel fibro-cartilagineux organisé de façon concentrique autour d'un *nucleus pulposus* au centre et d'un *annulus fibrosus* qui l'entoure (Henson, 2009). Le foramen intervertébral, matérialisé par des encoches en régions crâniale et caudale de chaque arc vertébral, se situe entre deux corps vertébraux. C'est à ce niveau que sortent les nerfs, vaisseaux sanguins et lymphatiques. Des foramens latéraux peuvent aussi exister sur quelques vertèbres.

I.A.2. PARTICULARITES DES VERTEBRES CERVICALES

Parmi les vertèbres cervicales, on distinguera aisément la première (ou *atlas*), la deuxième (ou *axis*), et les cinq suivantes, dont la morphologie est similaire entre elles.

L'atlas s'articule crânialement avec l'occiput et permet les mouvements de la tête. **L'axis** est la deuxième cervicale et sert d'attache aux muscles de l'encolure et en partie au ligament nuchal. Ces deux vertèbres sont reliées entre elles par un ligament. Le canal intervertébral est plus large entre ces deux vertèbres, ce qui permet l'accompagnement de la moelle épinière aux mouvements amples de cette articulation (Pilliner et al., 2009).

Les cervicales suivantes présentent un processus épineux court et des apophyses transverses divisées en une partie crâniale et une partie caudale qui permettent l'insertion de différents muscles de l'encolure. Le ligament supra épineux unit les vertèbres cervicales avec les autres vertèbres.

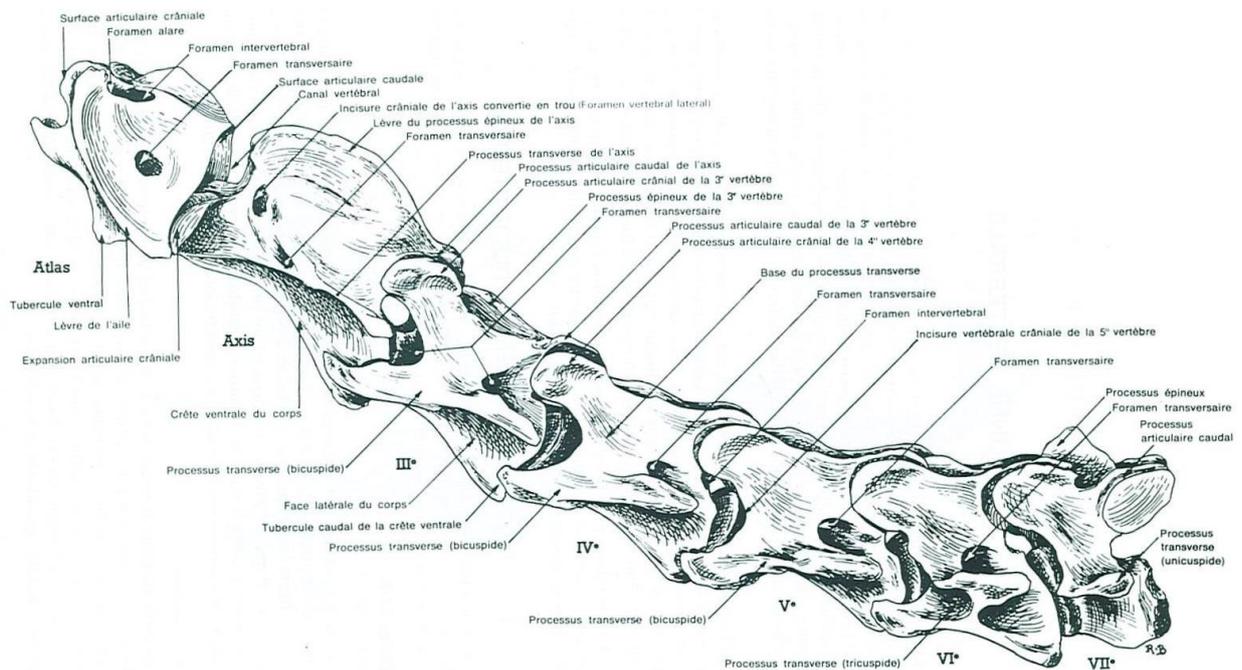


Figure 3 : Vertèbres cervicales du cheval en vue latérale gauche, d'après (Barone, 1976)

I.A.3. PARTICULARITES DES VERTEBRES THORACIQUES

La première vertèbre thoracique se distingue des vertèbres cervicales qui la précèdent par la présence d'un long processus épineux orienté dans le sens cranio-caudal. Les processus des vertèbres thoraciques T2 à T8 sont encore plus grands, en particulier entre les quatrième et septième vertèbres thoraciques où elles constituent le **garrot**. La taille de ces processus permet de fortes attaches musculaires et ligamentaires. Elle décroît ensuite jusqu'aux environs de la douzième vertèbre thoracique et de la **vertèbre dite anticlinale** (T15), dont le processus épineux est presque vertical. Les processus épineux passent alors d'une orientation dorso-caudale à une orientation dorso-crâniale.

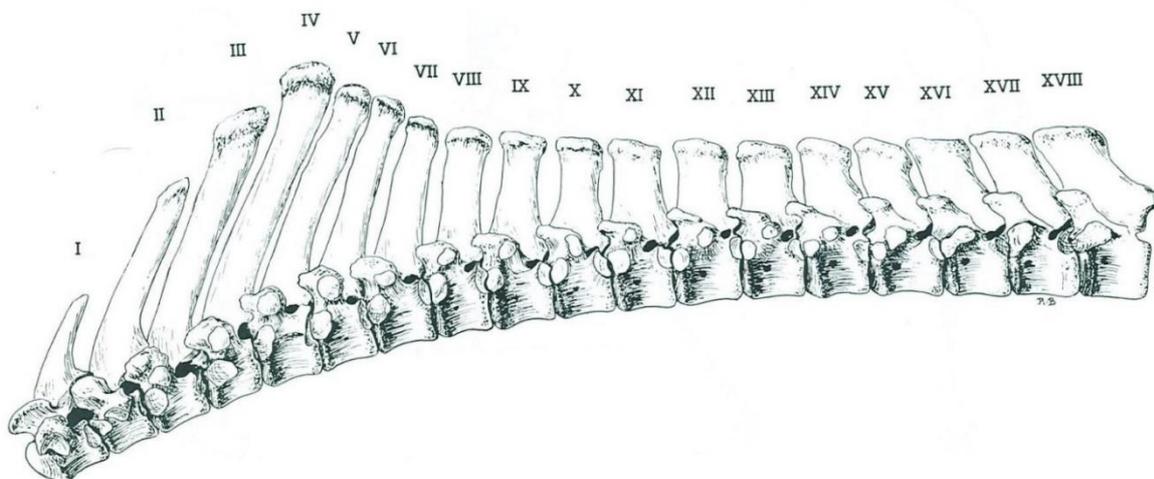


Figure 4 : Vertèbres thoraciques du cheval en vue latérale gauche, d'après (Barone, 1976)

Les vertèbres thoraciques permettent la suspension du thorax par leurs articulations aux côtes au moyen des fossettes articulaires costales crâniales, caudales et transverses. Les côtes sont dites **sternales** lorsqu'elles sont reliées au sternum directement, **asternales** si elles le sont par un tissu élastique formant l'arc costal, ou **flottantes** lorsqu'elles n'y sont pas reliées (Klaus-Dieter et al., 2009).

Les mouvements de ces vertèbres sont limités par les ligaments puissants et les nombreux reliefs des vertèbres. En effet, les processus épineux de taille importante limitent le mouvement d'extension, le ligament jaune reliant les arcs vertébraux entre chaque vertèbre limite la flexion, les processus transverses et la présence de côtes limitent la latéroflexion. La mobilité du dos diminue avec l'âge du cheval, car ses disques intervertébraux ont tendance à s'ossifier et s'épaissir (Pilliner et al., 2009).

I.A.4. PARTICULARITES DES VERTEBRES LOMBAIRES

Les vertèbres lombaires comportent de grands processus transverses qui s'articulent entre eux. Ils limitent les mouvements de cette partie du dos, et en font la zone la moins mobile après le sacrum. Les vertèbres lombaires soutiennent l'abdomen du cheval (Pilliner et al., 2009).

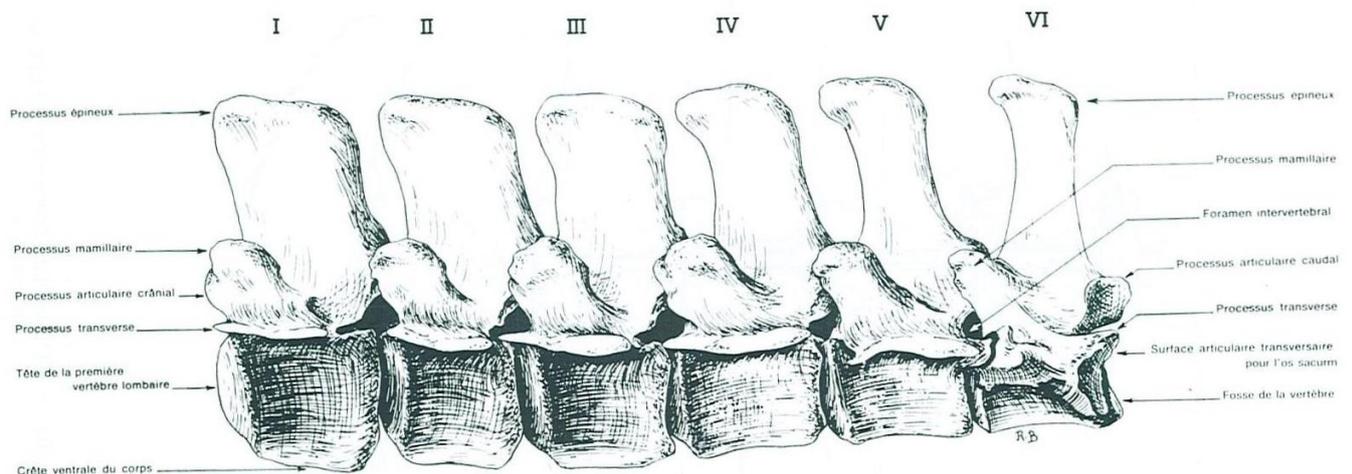


Figure 5 : Vertèbres lombaires du cheval en vue latérale gauche, d'après (Barone, 1976)

I.A.5. PARTICULARITES DES VERTEBRES SACREES

Les cinq vertèbres sacrées du cheval se soudent entre elles vers l'âge de 4 ou 5 ans formant ainsi le sacrum. Au niveau de la jonction lombo-sacrée, les processus épineux changent à nouveau d'orientation, passant d'une orientation dorso-crâniale à une orientation dorso-caudale. L'absence de vertèbre anticlinale entraîne la formation d'un espace inter-épineux important. La première vertèbre sacrée possède des processus transverses larges s'articulant avec la dernière lombaire pour former l'articulation lombo-sacrée, qui est l'articulation la plus mobile de la colonne vertébrale (Henson, 2009). Ces ailes du sacrum participent également à la formation de l'articulation sacro-iliaque et donc au lien fort entre les membres pelviens et le tronc du cheval. L'articulation sacro-iliaque est une articulation à la fois synoviale et symphysaire, elle est relativement fixe grâce à ses nombreux ligaments (Klaus-Dieter et al., 2009; Pilliner et al., 2009).

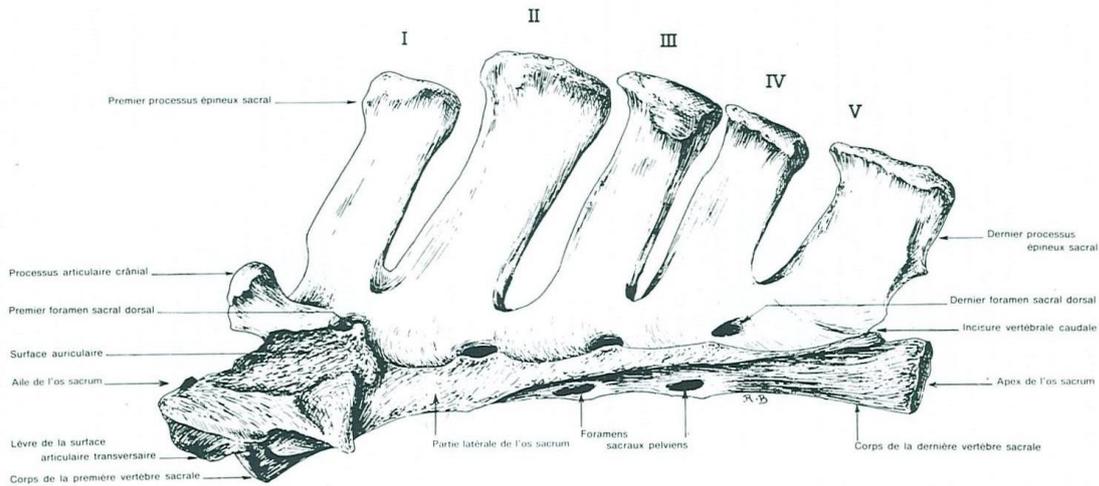


Figure 6 : Os sacrum du cheval en vue latérale gauche, d'après (Barone, 1976)

I.A.6. LE PELVIS

Le pelvis offre des repères anatomiques importants pour l'étude de la ligne du dessus du cheval. Il forme un ensemble avec le sacrum précédemment décrit et les premières vertèbres coccygiennes. Il est composé de deux *coxae*, eux même constitués d'un ilium, d'un pubis et d'un ischium, qui s'organisent autour de l'acétabulum (Henson, 2009). **L'ilium** comporte une aile, qui porte l'insertion de muscles glutéaux, une tubérosité sacrée (*tuber sacrale*), qui porte l'attache du ligament sacro-iliaque, une tubérosité coxale (*tuber coxae*), qui donne la pointe de la hanche, et une épine ischiatique. Le foramen obturé, dans le plancher pelvien, laisse passer le nerf obturateur et des vaisseaux sanguins. **L'ischium** porte des tubérosités ischiatiques (*tuber ischii*) palpables au niveau de la pointe de la fesse.

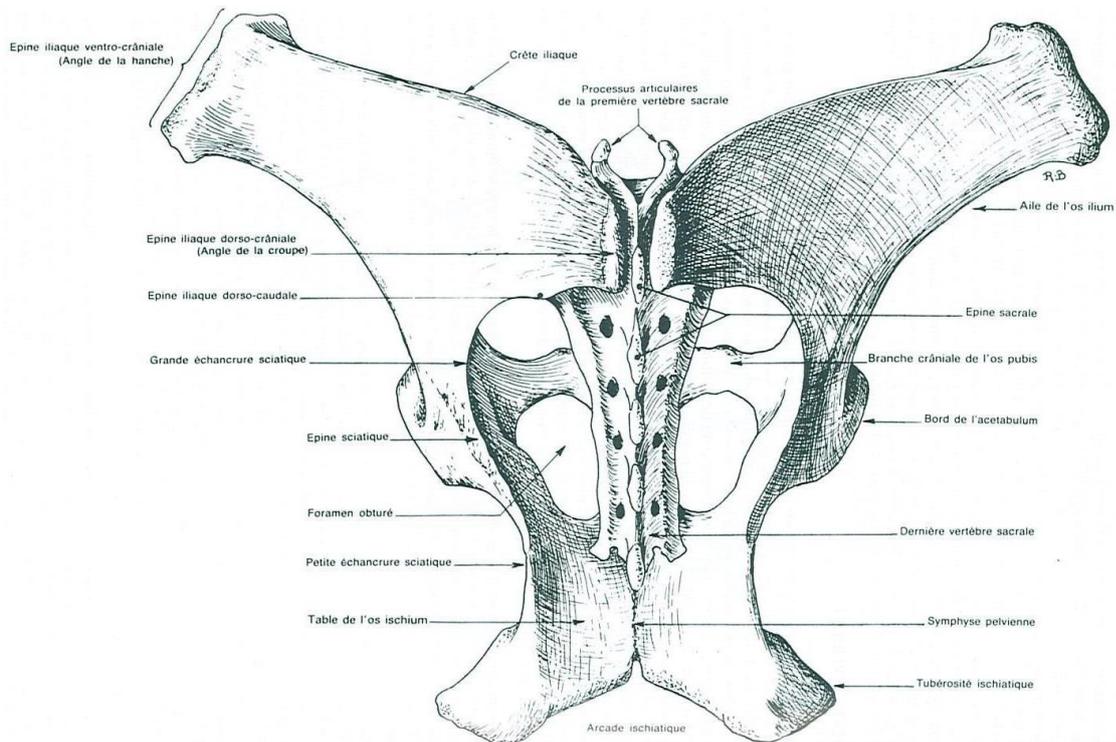


Figure 7: Bassin osseux du cheval en vue dorsale, d'après (Barone, 1976)

I.B. LES TISSUS MOUS

I.B.1. LES MUSCLES

Les muscles de la ligne du dessus s'attachent sur le squelette axial ou aux fascias. Parmi ces muscles, on trouve (Henson, 2009) :

- Les **muscles épiauxiaux**, qui se situent dorsalement aux processus transverses, permettant principalement l'extension de la colonne vertébrale et sa flexion latérale.
- Les **muscles hypaxiaux**, qui se situent ventralement aux processus transverses, permettant principalement la flexion de la colonne vertébrale, et participant à ses mouvements latéraux.

La flexion de la colonne vertébrale est également due aux muscles abdominaux.

I.B.1.1. LES MUSCLES DE L'ENCOLURE

Les muscles de l'encolure sont groupés autour des vertèbres cervicales et beaucoup d'entre eux se poursuivent jusqu'à la tête. Ils mobilisent le balancier cervico-céphalique, dont le rôle est très important dans l'équilibre et la locomotion (Barone, 1980).

Les muscles cervicaux dorsaux sont principalement extenseurs de l'encolure, les muscles cervicaux ventraux sont essentiellement fléchisseurs de l'encolure tandis que les muscles profonds sont impliqués dans les mouvements de rotation. De plus, de nombreux muscles cervicaux forment un moyen d'union aux membres thoraciques.

- ***Les muscles extenseurs de la région cervico-céphalique (Figures 8 et 9) :***

Les muscles dorsaux de l'encolure sont situés dorsalement aux vertèbres cervicales et séparés de part et d'autre de l'encolure par le ligament nuchal. Ils regroupent principalement des muscles extenseurs (Poulain, 2018) :

- Le **muscle trapèze** est grand, plat, triangulaire et s'étale sur l'encolure, le dos et les épaules. Il permet l'extension et la latéro-flexion de l'encolure et l'abduction de l'épaule. Sa partie cervicale est peu développée, prend son origine sur la moitié caudale de la corde du ligament nuchal et se termine par la lame aponévrotique sur l'épine scapulaire. La partie thoracique déborde légèrement le garrot, et prend son origine sur le ligament supraépineux du troisième au neuvième processus épineux thoraciques.
- Le **muscle omotransverse** est large, en forme de triangle. Il s'insère à son origine sur la partie caudale de l'aile de l'atlas, les processus transverses de l'axis et les deux vertèbres cervicales suivantes. Sa terminaison est composée d'une aponévrose qui s'attache sur la moitié distale de l'épine scapulaire.
- Le **muscle rhomboïde** unit la colonne vertébrale à la scapula. C'est un muscle plat, court et épais. Sa face superficielle est couverte par une très mince aponévrose et sa face profonde doublée d'une très épaisse lame élastique, le ligament dorso-scapulaire. Cette lame participe à la fixation de la scapula au tronc. Son origine se fait sur la corde du ligament nuchal, sur le ligament supra-épineux et sur le sommet des processus

épineux des six premières vertèbres thoraciques. Sa terminaison s'effectue sur le revers médial du bord dorsal de la scapula.

- Le **muscle dentelé du cou** est un muscle plat triangulaire, en continuité avec le muscle dentelé ventral du thorax. Il prend son origine sur les processus transverses des cinq dernières vertèbres cervicales. Sa terminaison, non dissociable de celle du muscle dentelé du thorax, se fait sur le revers médial de l'angle crânial de la scapula.
- Le **muscle splenius** permet, en plus de l'extension de l'encolure, l'inclinaison latérale de la tête et la transmission des tensions myofasciales le long de l'axe vertébral. Sa partie céphalique rejoint le processus mastoïde et la crête mastoïdienne par une aponévrose qui s'unit au tendon du muscle longissimus de la tête. Sa partie cervicale est formée par un fort tendon qui s'unit à celui des muscles longissimus de la tête et omotransversaire et se termine sur l'aile de l'atlas. Trois autres digitations rejoignent les processus transverses des troisième, quatrième et cinquième vertèbres cervicales. Son activité avant le poser et pendant la première moitié de la phase d'appui de chaque membre thoracique participe à l'amortissement et au contrôle de l'amplitude de la flexion cervicale. Son activité dans la deuxième moitié de la phase d'appui et pendant les phases de suspension permet de relever le balancer céphalique. A la base du cou, le fascia thoraco-lombaire se confond avec l'aponévrose du muscle splénus, ce qui permet la coordination des mouvements de l'encolure et du tronc.
- Le **muscle semi-épineux** présente deux parties distinctes allant des vertèbres cervicales et des premières vertèbres thoraciques jusqu'à l'os occipital. Il est un puissant extenseur de la nuque et de l'encolure et permet également l'inclinaison de la tête sur le côté. La partie dorsale prend origine par une aponévrose épaisse sur les processus épineux du garrot et par quatre ou cinq languettes aponévrotiques sur les processus transverses de quatre ou cinq vertèbres thoraciques. La partie ventrale prend son origine sur les processus transverses des deux premières vertèbres thoraciques et sur les processus articulaires des six dernières vertèbres cervicales. La terminaison se fait par un tendon au niveau de l'insertion de la corde du ligament nuchal.
- Les **muscles longissimus de l'atlas et de la tête** joignent les dernières vertèbres cervicales et les premières vertèbres thoraciques à l'atlas. Ils permettent également l'inclinaison latérale de la tête et du cou. Leur origine se fait sur les processus transverses de deux premières vertèbres thoraciques et sur les processus articulaires des six dernières cervicales. Leurs terminaisons se font par deux tendons qui aboutissent à l'aile de l'atlas et au processus mastoïde de l'os temporal. Ils adhèrent aux terminaisons du muscle splénus.
- Le **muscle semi-épineux de la tête** constitue le plan le plus profond de la région dorsale du cou. Il occupe l'espace entre les vertèbres cervicales et les premières thoraciques, ainsi que le bord dorsal du cou jusqu'à l'occiput. C'est l'extenseur de la tête le plus puissant. Sa partie dorsale appelée **muscle digastrique du cou** constitue le muscle long épineux thoraco-occipital. Elle prend son origine sur les premiers processus épineux et transverses des vertèbres thoraciques. Sa partie la plus ventrale est nommée **muscle complexus**. Son origine se fait par de fortes digitations sur les processus transverses des premières vertèbres thoraciques et sur les processus articulaires des cinq ou six dernières cervicales. La terminaison des deux s'attache à la protubérance occipitale externe.

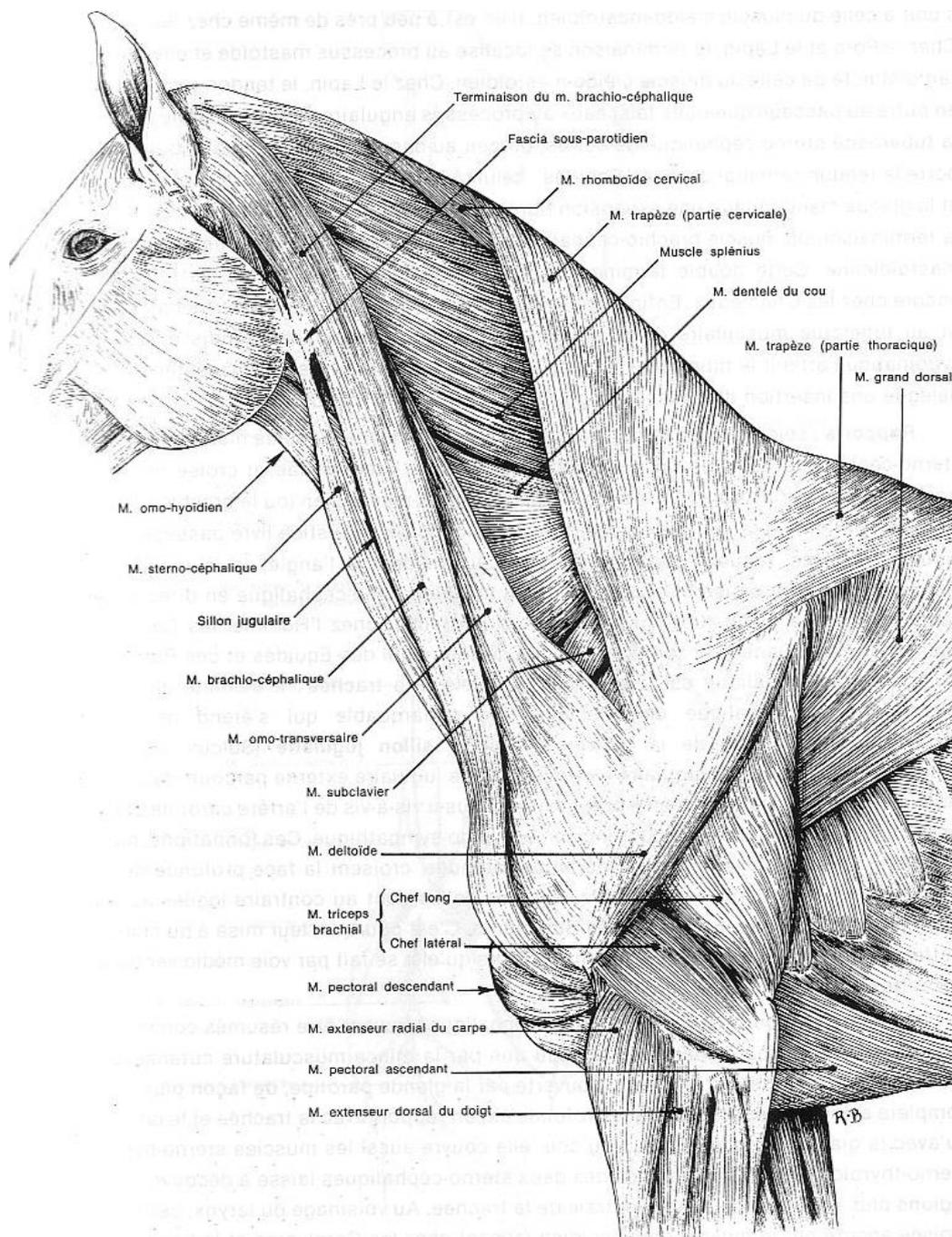


Figure 8: Muscles superficiels de l'encolure du cheval, d'après (Barone, 1980)

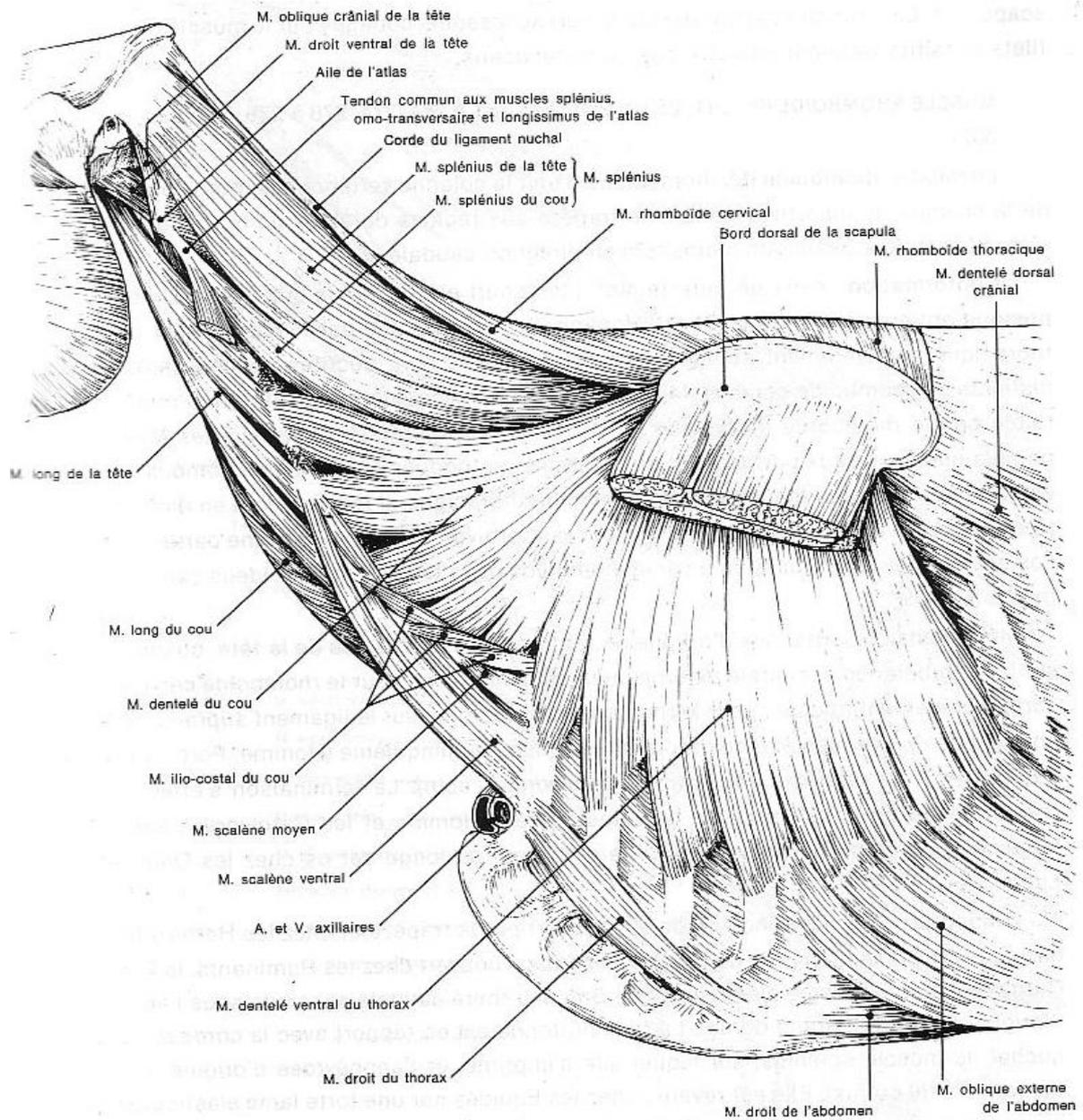


Figure 9 : Muscles Dorsaux du cou du cheval, deuxième plan, vue latérale gauche, d'après (Barone, 1980)

- *Les muscles fléchisseurs de la région cervico-céphalique (Figure 10) :*

Les muscles ventraux de l'encolure regroupent les muscles fléchisseurs de l'encolure et de la tête. Ils se divisent en quatre groupes fonctionnels (Poulain, 2018) :

- Les **muscles longs**, situés à la face ventrale des vertèbres cervicales et des premières thoraciques. Ce sont des muscles juxta-vertébraux qui permettent la flexion de l'encolure. Le **muscle long du cou** il est divisé en une partie cervicale, qui s'insère sur la face ventrale des vertèbres cervicales C2 à C7 et se termine sur la face ventrale des vertèbres plus crâniales, et une partie thoracique, qui s'insère sur le corps des vertèbres thoraciques T2 à T6 et se termine sur le processus transverse de la vertèbre cervicale C6. Il a un rôle accessoire de torsion de la colonne vertébrale. Le **muscle long de la tête** prolonge le muscle long du cou, il a pour origine la face ventrale des processus transverses des vertèbres cervicales C2 ou C3 jusqu'à C6, et se termine par un gros tendon rejoignant le tubercule musculaire à la jonction entre les os occipital et sphénoïde.
- Les **muscles scalènes** ont un rôle initiateur des mouvements inspiratoires et permettent également la flexion et la latéroflexion de l'encolure. Le muscle scalène ventral est le plus épais. Il prend origine sur le tubercule ventral des troisième, quatrième, cinquième et sixième processus transverses cervicaux. Il se termine au bord crânial et à la face latérale de la première côte. Le muscle scalène moyen est situé dorsalement, et médialement au muscle saclène ventral. Il prend son origine sur le tubercule ventral transverse de la septième cervicale, dorsalement au muscle scalène ventral. Sa terminaison se fait au bord crânial et à la face latérale de la première côte.
- Le **muscle sterno-céphalique** est un muscle long, situé ventro-latéralement à la trachée, dont la contraction bilatérale permet de contrôler l'amplitude d'extension cervicale et la contraction unilatérale permet des mouvements de latéroflexion et de rotation de la tête et du cou. Il joint le manubrium sternal à la mandibule.
- Le **muscle brachio-céphalique** est situé sur le côté de l'encolure, dorsalement au muscle sterno-céphalique. Lors d'action unilatérale, il permet des mouvements de rotation et de latéroflexion de la nuque et de l'encolure. Il est constitué de deux parties : une **cléido-brachiale** qui prend son origine sur la crête humérale et une **cléido-mastoïdienne** qui la prolonge et se termine par une aponévrose sur la crête mastoïdienne. Il intervient essentiellement dans la mobilisation du membre thoracique, c'est un agent de la protraction.

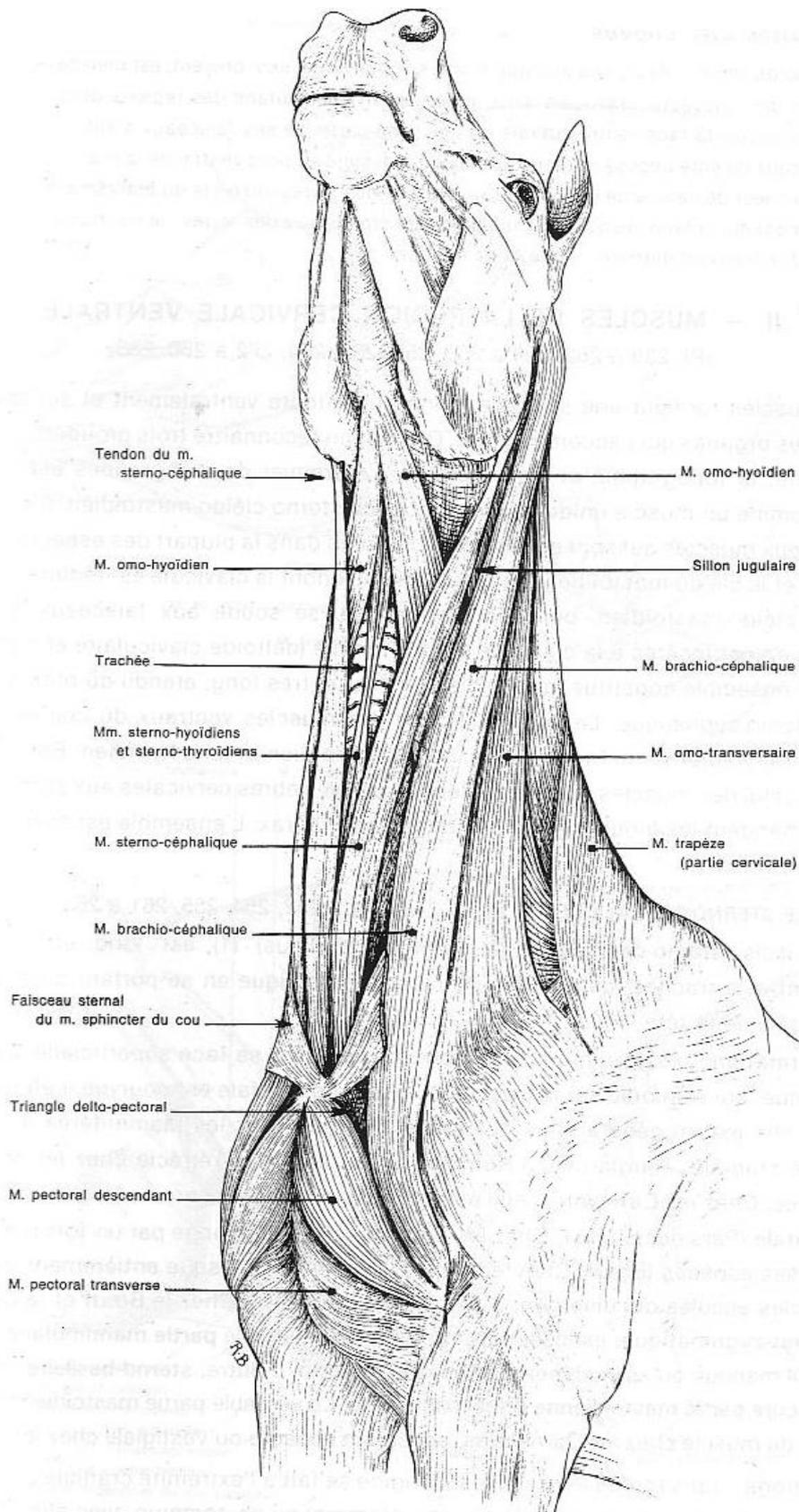


Figure 10 : Muscles ventraux de l'encolure du cheval, d'après (Barone, 1980)

- **Les muscles stabilisateurs de la région cervico-céphalique :**

Les muscles profonds péri-vertébraux sont directement appliqués contre les vertèbres et interviennent dans la stabilité posturale.

- Le **muscle multifide** est organisé en faisceaux charnus obliques cranio-dorsalement qui se chevauchent. Ils relient les processus articulaires des vertèbres C2 ou C3 jusqu'à T2 aux processus épineux des vertèbres cervicales C2 à C6. Il est extenseur et fléchisseur latéral du cou, et participe aux torsions de la colonne vertébrale.
- Le **muscle épineux du cou** est plat, majoritairement charnu, formé de nombreux faisceaux qui forment le système épineux du cou. Ces faisceaux s'insèrent sur le côté des premiers processus épineux thoraciques et sur les derniers processus épineux cervicaux, dorsalement aux attaches du muscle multifide. La terminaison se fait sur les processus épineux des quatre dernières vertèbres cervicales. C'est un puissant extenseur du cou.
- Les **muscles inter-épineux du cou** sont des petits muscles courts, minces, qui partent des quatre ou cinq derniers processus épineux cervicaux et vont jusqu'au premier processus épineux thoracique et au dernier cervical. Ils sont contre les ligaments inter-épineux.
- Les **muscles intertransversaires du cou** sont très développés et sont situés dans les espaces entre les processus transverses des vertèbres cervicales à partir de l'axis, ainsi qu'entre ceux de la dernière cervicale et de la première thoracique. Les muscles intertransversaires du cou permettent l'incurvation de l'encolure.

I.B.1.2. LES MUSCLES DU TRONC

- **Les muscles extenseurs du dos :**

Les muscles extenseurs du dos sont composés de trois groupes de muscles : les muscles épi-axiaux (ou *m. erector spinae*), le m. glutéal moyen et le m. multifide (Klaus-Dieter et al., 2009). Ils se répartissent sur trois épaisseurs : profonds, moyens et superficiels.

Les muscles épi-axiaux les plus superficiels regroupent :

- Le **muscle trapèze** : il a pour origine le ligament supra-épineux entre les vertèbres thoraciques T3 et T7 et s'insère sur l'épine scapulaire. Il s'étend sous la peau et les fascias. Il attache le membre antérieur au cou et au thorax, et élève la scapula.
- Le **muscle grand dorsal** : son origine est large sur le fascia et le ligament supra-épineux en région thoraco-lombaire et sur les côtes. Il s'insère principalement sur le tendon du muscle grand rond et sur les tendons d'autres muscles cervicaux. Il attache le membre antérieur au cou et au tronc, participe à l'extension du cou, et rétracte le membre antérieur.

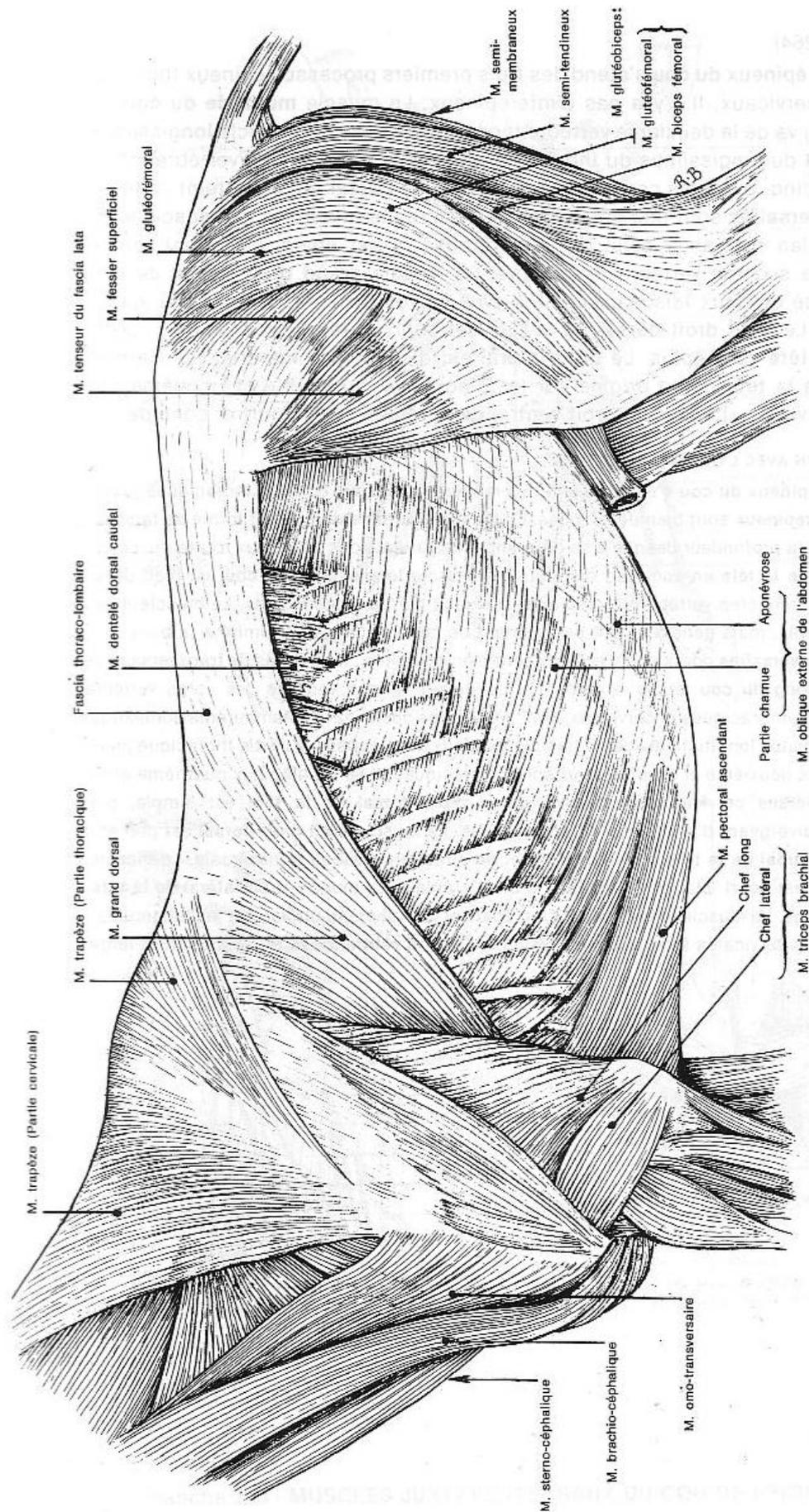


Figure 11: Les muscles superficiels du tronc du cheval en vue latérale gauche d'après (Barone, 1980)

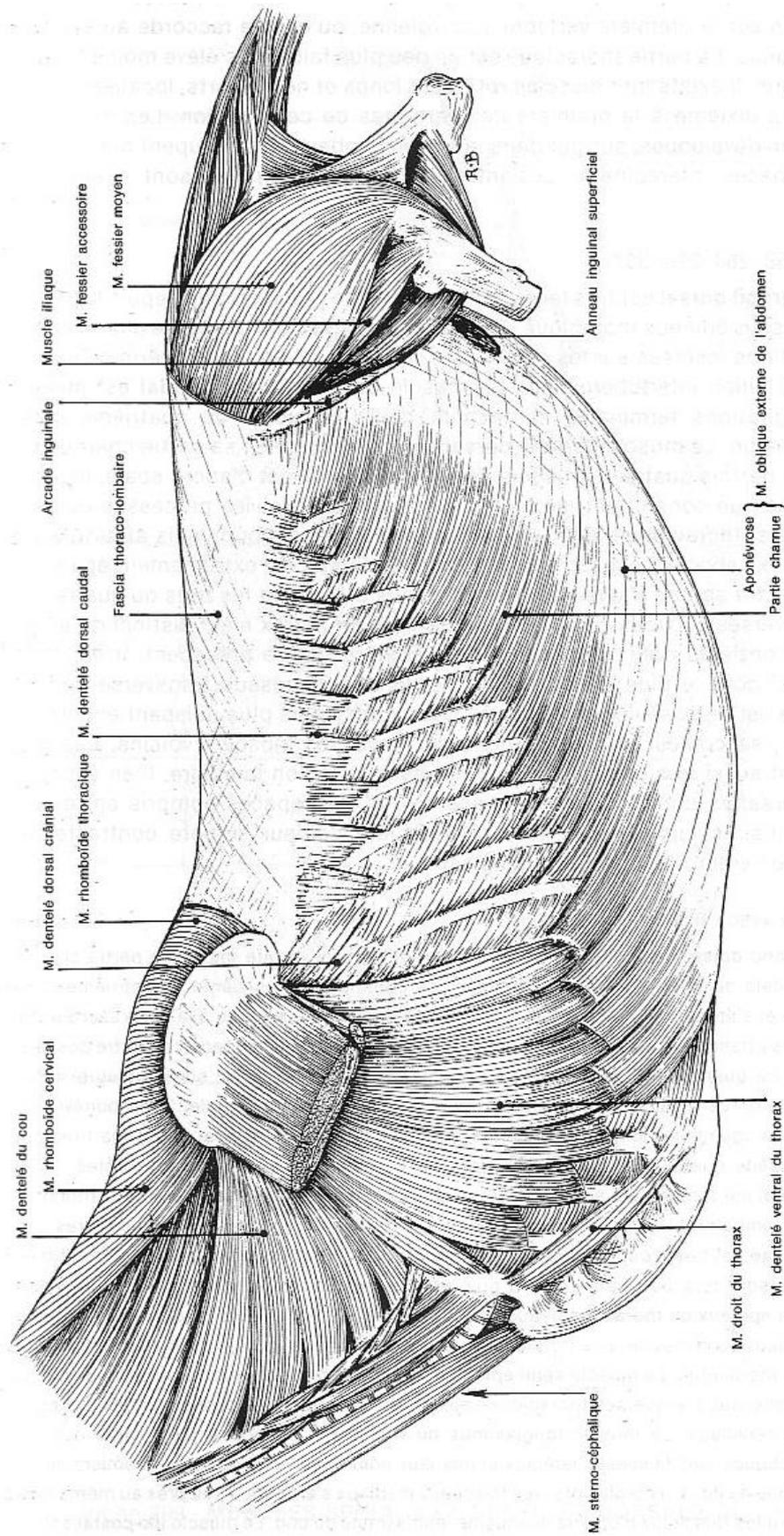


Figure 12: muscles du thorax et de l'abdomen, plan des muscles dentelés ventraux et oblique externe de l'abdomen, d'après (Barone, 1980)

Parmi les muscles de profondeur moyenne, on trouve (Henson, 2009) :

- Le **muscle rhomboïde thoracique** : il a pour origine les processus épineux des vertèbres thoraciques T2 à T7 via le ligament scapulaire dorsal et s'insère sur la face médiale du cartilage de la scapula. Il est élévateur de l'encolure, et de la scapula et participe à l'attachement du membre antérieur au cou et au thorax, élève le cou, remonte et avance la scapula.
- Les **muscles dentelés dorsaux crânial et caudal** : ils ont pour origine le fascia lombaire dorsal et le ligament scapulaire dorsal, et s'insèrent sur les côtes. Ils passent sous les muscles rhomboïde, dentelé ventral et grand dorsal, et recouvre le muscle ilio-costal. Le pendant crânial participe à la phase inspiratoire en tirant les côtes crânialement et latéralement pendant que le pendant caudal participe à la phase expiratoire en tirant les côtes caudalement.

Les muscles précédemment cités recouvrent les muscles du plan profond, constitué de :

- Le **muscle ilio-costal thoracique** : il a pour origines le bord crânial des quinze dernières côtes, les processus transverses et la couche profonde des fascia dorsaux lombaires au niveau des vertèbres lombaires L3 et L4. Il s'insère sur les processus transverses des dernières vertèbres cervicales et sur les côtes. C'est le muscle le plus latéral des muscles épiaux. Lors d'une contraction bilatérale, il participe à l'expiration en rétractant les côtes. La contraction unilatérale pourrait participer aux mouvements latéraux de la colonne vertébrale. Il a un rôle de stabilisateur des vertèbres thoraciques (Henson, 2009).
- Le **muscle long dorsal** ou longissimus du thorax : il a pour origines le ligament supra-épineux, les processus épineux thoraciques, lombaires, et des vertèbres sacrées S1 à S3, et l'ilium. Il s'insère sur les processus épineux et transverses des vertèbres cervicales C4 à C7, les processus transverses des vertèbres thoraciques, les surfaces latérales des côtes à l'exception de la première, et les processus transverses et articulaires des vertèbres lombaires. C'est un muscle majeur du dos : il remplit l'espace entre les processus épineux et transverses. Il est recouvert par le fascia thoraco-lombaire. Il est le muscle extenseur principal du dos, mais il est aussi une aide à l'expiration. Sa contraction unilatérale pourrait participer aux mouvements latéraux de la colonne vertébrale. Il participe à la rotation axiale des vertèbres (Groesel et al., 2010; Haussler, 1999; Henson, 2009).
- Le **muscle multifide** : il a pour origines les processus transverses des vertèbres thoraciques, les processus articulaires des vertèbres lombaires, et la partie latérale du sacrum. Il s'insère sur les processus épineux des vertèbres C7, thoraciques et lombaires, sur S1 et S2. Il est le muscle épiaux le plus médial : il est au contact des processus épineux. Constitué de multiples segments se chevauchant, il est prolongé par le muscle sacro-caudal dorsal latéral. Le muscle multifide est extenseur et rotateur de la colonne vertébrale, et stabilisateur profond de la colonne vertébrale en région thoracique, lombaire et sacrée. En effet, il compense les forces de rotation et de cisaillement. Il compense également les mouvements de contraction concentrique des muscles hypaux abdominaux et sous-lombaires qui tendent à tordre la colonne vertébrale. Il est ainsi responsable pour deux tiers de la rigidité de la ligne du dessus. La contraction unilatérale permet la flexion latérale de la colonne vertébrale (Barone, 1980; Henson, 2009; Stubbs et al., 2011).

- Le **muscle intertransversaire des lombes** : il a pour origines et terminaisons les processus transverses des vertèbres lombaires. Il maintient une position fixe de la colonne vertébrale. Lors de contraction unilatérale, il aide à la flexion latérale. Il participe enfin à la coordination des mouvements de la colonne vertébrale (Henson, 2009).

Les muscles épineux, long dorsal, et ilio-costal forment ensemble un complexe extenseur de la colonne vertébrale appelé **muscle erector spinae**. Cette « masse commune » relie la région caudale de l'ilium aux vertèbres cervicales et aux premières côtes. Elle est également extenseur de l'articulation lombo-sacrée (Denoix, 2014).

- *Les muscles fléchisseurs du dos :*

Les muscles hypaxiaux fléchisseurs de l'articulation coxo-fémorale donnent de la stabilité à la région lombo-sacrée de la ligne du dessus (H. M. Clayton & Schamhardt, 2001; Sisson, 1975). Ils contribuent également à l'engagement des membres postérieurs en favorisant leur protraction (Van Weeren, 2014). Ces muscles hypaxiaux comprennent (Barone, 1980; Henson, 2009) :

- Le **muscle grand psoas** : il a pour origines les deux dernières côtes, et les processus transverses des vertèbres lombaires, et s'insère sur le fémur. Il est responsable de la flexion de l'articulation sacro-iliaque, de celle de la hanche et de la rotation externe du membre postérieur.
- Le **muscle petit psoas** : il a pour origines les côtes seize et dix-sept et les corps vertébraux à partir de la quinzième vertèbre thoracique et jusqu'à la quatrième vertèbre lombaire. Il s'insère sur le tubercule du petit psoas sur l'os coxal. Il permet la flexion de l'articulation sacro-iliaque et de la hanche et les mouvements latéraux du pelvis.
- Le **muscle iliaque** : il a pour origines l'aile de l'ilium, la surface ventrale de l'ilium, et le tendon du muscle petit psoas. Il s'insère sur le petit trochanter du fémur. Il fléchit la hanche et permet une rotation externe du membre postérieur.
- Le **muscle carré lombaire** : il a pour origines la face ventrale des deux dernières côtes et les processus transverses des vertèbres lombaires. Il s'insère sur la face ventrale du sacrum, et sur le ligament sacro-iliaque ventral. Il maintient fixe les deux dernières côtes, et permet la flexion latérale de la colonne vertébrale.

I.B.2. LES LIGAMENTS

Le **ligament nuchal** est un ligament épais qui joue un rôle important dans le soutènement de la tête. Il est composé d'une corde et d'une lame. La **corde du ligament nuchal** s'étend de la crête occipitale externe aux sommets du quatrième processus épineux thoracique et des processus suivants, au niveau desquels elle se continue par le ligament supra-épineux thoraco-lombaire. Des bourses séreuses permettent le glissement de la corde du ligament nuchal sur le sommet des processus épineux thoraciques et sur l'arc dorsal de l'atlas et de l'axis. La **lame du ligament nuchal** est une large cloison médiane qui joint la corde aux processus épineux cervicaux. Cet ensemble vient en aide aux muscles extenseurs de la tête et joue un rôle actif dans la locomotion (Barone, 1980; Henson, 2009).

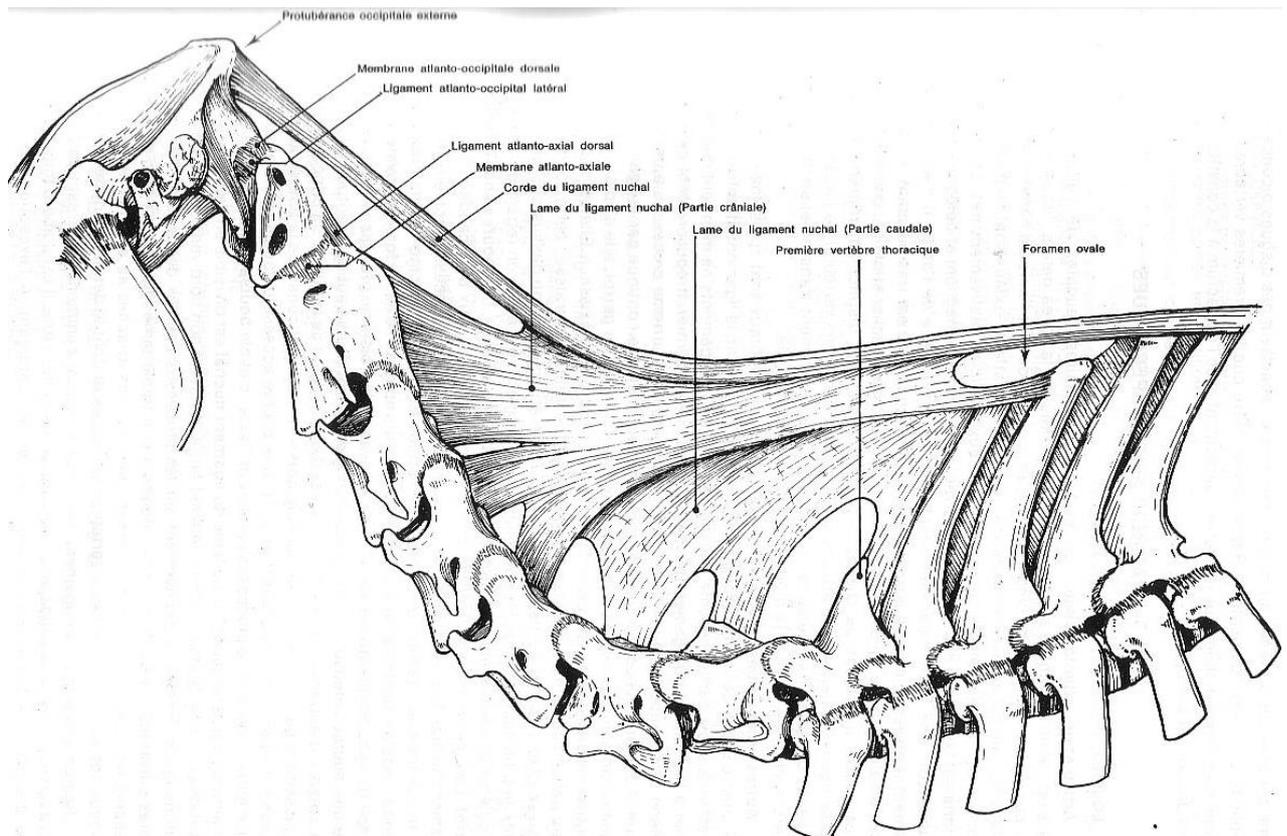


Figure 13 : Ligament nuchal du cheval en vue latérale gauche, d'après (Barone, 1980)

Le **ligament supra-épineux** prolonge le ligament nuchal dans la région thoraco-lombo-sacrée. Il s'insère sur les processus épineux des vertèbres thoraciques caudales et lombaires, ainsi que sur le ligament inter-épineux. Il reçoit les aponévroses des muscles trapèze, grand dorsal dentelé dorsaux du thorax fascia thoraco-lombaire et fascia glutéal (Barone, 1980). Il joue un rôle important dans la mécanique de la colonne vertébrale car il se tend lors de la flexion et se relâche lors du redressement ou de l'incurvation dorsale. Lors de la flexion, il s'oppose à l'écartement des processus épineux (Henson, 2009).

La colonne vertébrale est stabilisée par un ensemble de ligaments forts et courts. Les arcs vertébraux sont reliés par des ligaments très courts qui ferment les espaces qui séparent les arcs vertébraux successifs appelés **ligaments interlamellaires** ou **ligaments jaunes**. Les **ligaments interépineux** occupent les espaces qui séparent les processus épineux les uns aux autres et fusionnent dorsalement avec le ligament supra-épineux (Barone, 1980). Les **ligaments inter-transverses** relient deux processus transverses adjacents en région lombaire, y limitant ainsi la flexion latérale (Henson, 2009).

Les moyens d'union de l'articulation sacro-iliaque sont les suivants :

- Le **ligament sacro-iliaque ventral** : part de la circonférence du sacrum et se fixe sur la face ventromédiale de la tubérosité sacrale et de l'aile de l'ilium est plus rigide dorsalement, ce qui limite les mouvements de rotation ou de glissement de l'articulation (Henson, 2009).

- Le **ligament sacro-iliaque dorsal** : doté de deux composantes : l'une très fine, dite « en corde », part des vertèbres sacrées et rejoint les tubérosités sacrées ; l'autre, plus membraneuse, « en triangle », part médialement à la tubérosité sacrale et rejoint latéralement le ligament sacro-sciatique.
- Le **ligament sacro-iliaque interosseux** : situé à la partie dorsale des surfaces articulaires de l'ilium et du sacrum.
- Le **ligament ilio-lombaire** : s'étend des derniers processus lombaires a revers ventral de la crête illiaque, et est une extension du ligament inter-transverse. Il fixe ainsi le pelvis à la colonne vertébrale lombaire (Henson, 2009).
- Le **ligament sacrosciatic** : s'étend entre le sacrum et l'os coxal et délimite latéralement la cavité pelvienne.

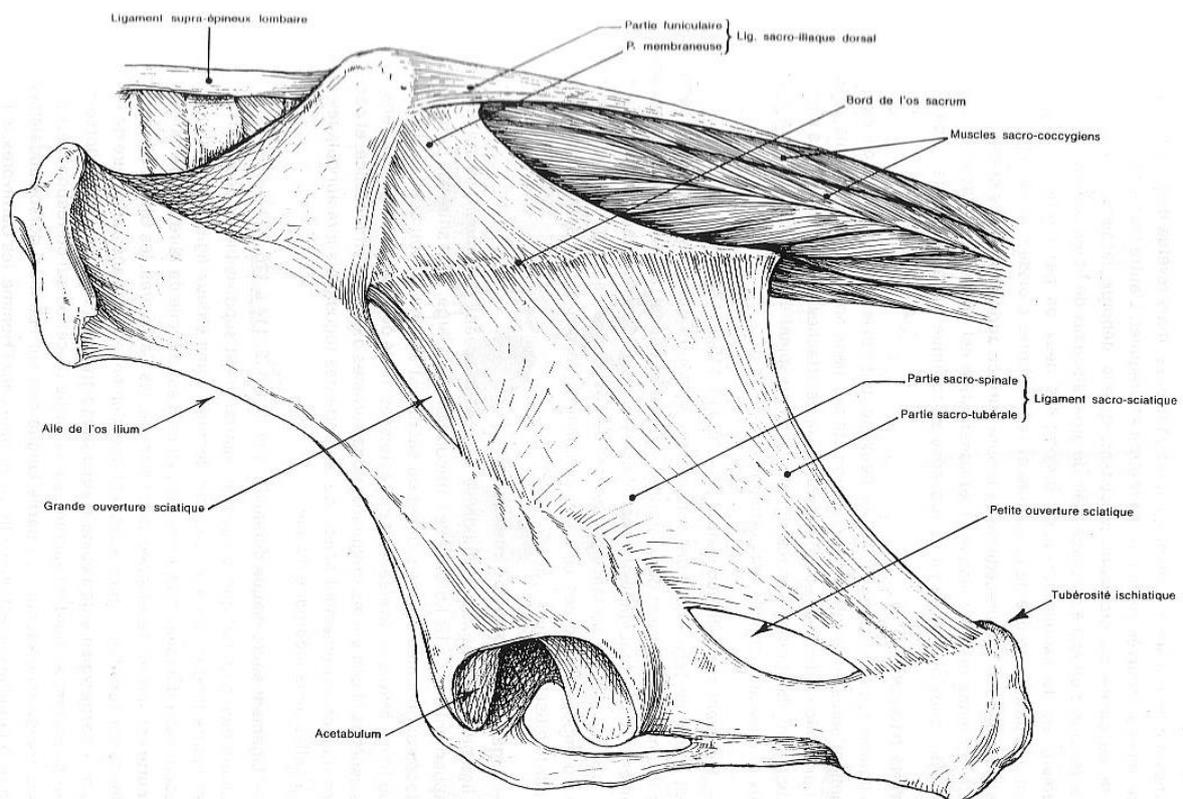


Figure 14: Articulation sacro-iliaque du cheval et ses ligaments, d'après (Barone, 1980)

II. BIOMECANIQUE DE LA LIGNE DU DESSUS DU CHEVAL

II.A. MOUVEMENTS ET MODELES BIOMECANIQUES APPLICABLES AU DOS DU CHEVAL

II.A.1. DEFINITION DES MOUVEMENTS ELEMENTAIRES

Chaque mouvement dans l'espace d'un corps rigide peut être décrit comme la combinaison de mouvements élémentaires associant translation et rotation (H. M. Clayton & Schamhardt, 2001). La **translation** décrit un déplacement dans l'espace suivant un des trois axes orthogonaux d'un repère cartésien (x, y, z). La **rotation** décrit un mouvement du corps sur lui-même, suivant les mêmes axes du repère cartésien.

Les mouvements de la ligne du dos du cheval résultent de l'association de trois mouvements élémentaires, comme décrits sur les figures 15 et 16 (Townsend et al., 1983) :

- La **flexion** ou **l'extension** (*flexion/extension*), qui correspond à la rotation autour de l'axe ventrodorsal du dos, ou axe x,
- La **rotation axiale** (*axial rotation*), autour de l'axe craniocaudal, ou axe y,
- La **latéroflexion** (*lateral bending*), autour de l'axe dorsoventral, ou axe z, qui permet d'incurver le tronc vers le côté gauche ou le côté droit.

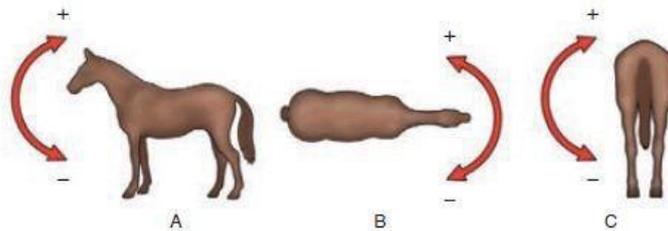


Figure 15 : Mouvements élémentaires du dos du cheval (A : flexion/extension, B : latéroflexion, C : rotation axiale) d'après (Townsend et al., 1983)

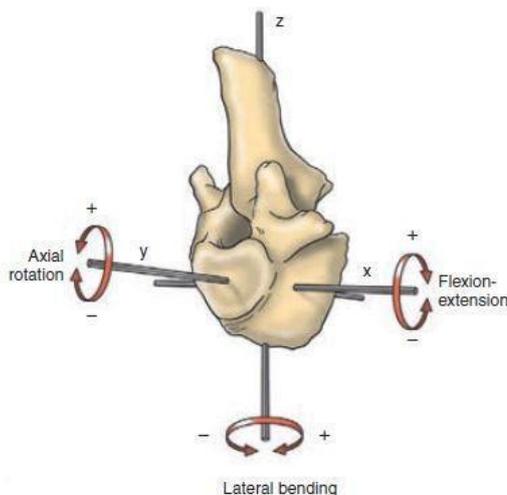


Figure 16: Mouvements élémentaires d'une vertèbre dans un repère orthogonal (x, y, z), d'après (Townsend et al., 1983)

Les mouvements de translations décrivent le cisaillement transversal (le long de l'axe x), de tension ou compression longitudinales du squelette axial (le long de l'axe y), ou de cisaillement vertical (le long de l'axe z). Concernant la biomécanique du dos du cheval, ils sont limités (Henson, 2009).

Si l'ensemble de la colonne vertébrale est soumis aux mouvements élémentaires précédemment décrits, certaines portions présentent une amplitude de mouvement plus importante que d'autres. Notamment, les cervicales permettent une large amplitude de mouvements. En revanche, les régions thoracique et lombaire présentent des restrictions de mouvement, dues à la forme de leurs articulations intervertébrales et des nombreux ligaments présents. Exception faite des cervicales, les amplitudes maximales de mouvement de flexion-extension sont observées en région lombo-sacrée et thoracique crâniale, et les amplitudes maximales de latéoflexion et rotation axiale sont observées au milieu de la colonne thoraco-lombaire (en T11 et T12).

Par ailleurs, les mouvements des vertèbres sont interdépendants car les contraintes anatomiques du dos résultent en une continuité entre les différents éléments qui le constituent. Ainsi, la latéoflexion du dos s'accompagne toujours d'un certain degré de rotation (Hodgson et al., 2014). Le sens de rotation est donné par la direction vers laquelle se tourne la face ventrale d'une vertèbre par rapport à la vertèbre suivante (caudale à la première) (Denoix, 2014).

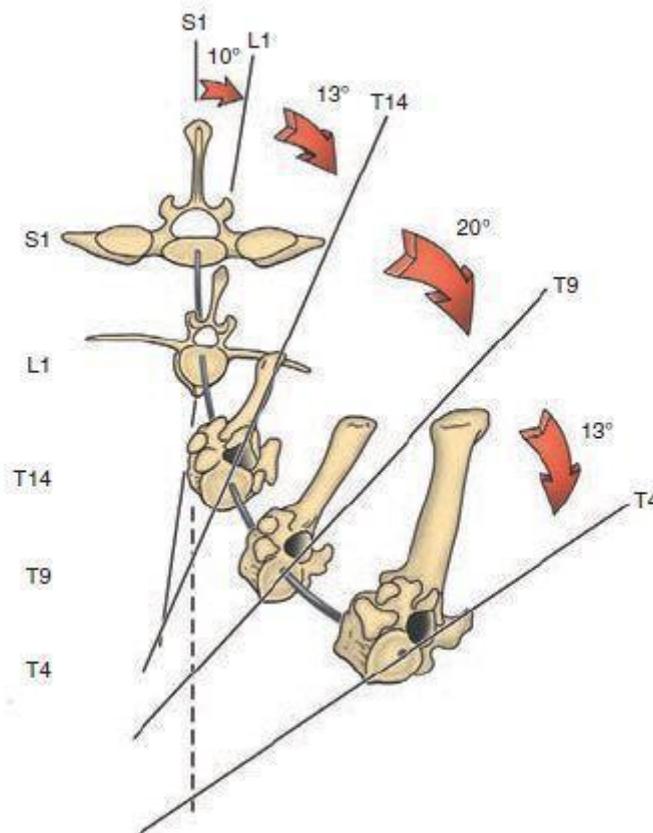


Figure 17 : Interdépendance des mouvements de latéoflexion et de rotation axiale sur une portion du rachis du cheval. D'après (Hodgson et al, 2014)

II.A.2. MODELE DU BOW AND STRING

Bien que plusieurs modèles aient été proposés au cours du temps pour décrire le fonctionnement biomécanique du dos du cheval, les études s'accordent actuellement sur le concept du « **bow and string** », ou de l'arc et la ficelle, proposé par Barthez (Van weeren et al., 2010). Il prend en compte le tronc dans son intégralité, avec :

- L'arc, constitué par la colonne vertébrale relativement rigide
- La ficelle, représentant la ligne blanche (*linea alba*), le muscle droit de l'abdomen (*rectus abdominis*) et les structures associées. Ce modèle suppose une relation dynamique dans la tension des différentes structures (Henson, 2009).

Ce modèle ne prend pas en compte les mouvements de flexion-extension lombosacrés ainsi que la rotation du pelvis autour de l'articulation coxo-fémorale (Van weeren et al., 2010).

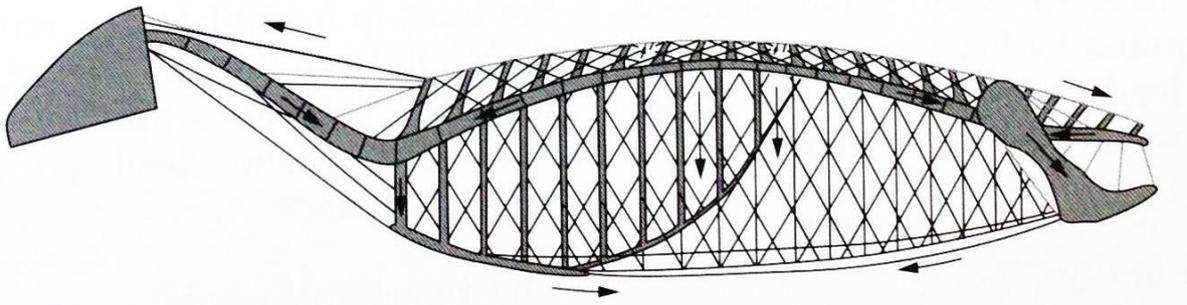


Figure 18 : Modélisation du dos du cheval en « bow and string » telle que décrite par Slijper, d'après (Van weeren et al., 2010)

Le système décrit par ce modèle est sous tension, et l'action des muscles fait varier l'équilibre entre l'arc et la ficelle. Si un élément est modifié cela va inévitablement modifier la biomécanique d'un autre (Hodgson et al., 2014). Les forces qui s'exercent sur la colonne vertébrale, sur la masse intestinale ou sur le cavalier assis sur le dos du cheval, entraînent des modifications de la biomécanique du dos : la colonne vertébrale va s'étendre ou se creuser (Henson, 2009).

L'activité musculaire va également modifier l'équilibre entre l'arc et la ficelle, par la contraction des muscles abdominaux, entraînant une flexion du dos, ou bien par la contraction des muscles épi-axiaux, qui vont à l'inverse résulter en une extension.

La tête et le cou influencent de manière significative l'ensemble bow-and-string :

- L'abaissement de la tête fléchit le dos en tendant le ligament nuchal qui va exercer une traction sur les processus épineux importants des premières vertèbres thoraciques, donnant naissance à un bras de levier important à l'origine de la flexion de l'arc.
- L'élévation de la tête provoque une extension du dos par un mécanisme inverse.

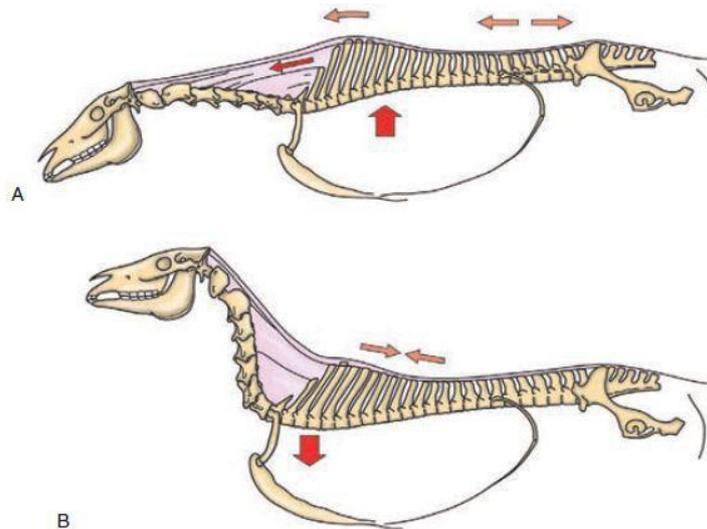


Figure 19 : Effets de mouvements de la tête et de l'encolure sur la flexion et l'extension thoraco-lombaire. A : Un abaissement de la tête va fléchir le dos. B : Une élévation de la tête va entraîner une extension du dos. D'après (Hodgson et al., 2014).

Les mouvements des membres ont également un effet sur l'équilibre entre l'arc et la ficelle :

- La protraction du membre postérieur fléchit le dos, grâce à la mise en tension des fascias situés entre le muscle glutéal moyen et les processus épineux des vertèbres lombaires et sacrées provoquée par la mobilisation du membre.
- La rétraction d'un membre antérieur fléchit le dos.
- La protraction d'un membre antérieur et la rétraction d'un membre postérieur étendent ou creusent le dos (Denoix, 2014).

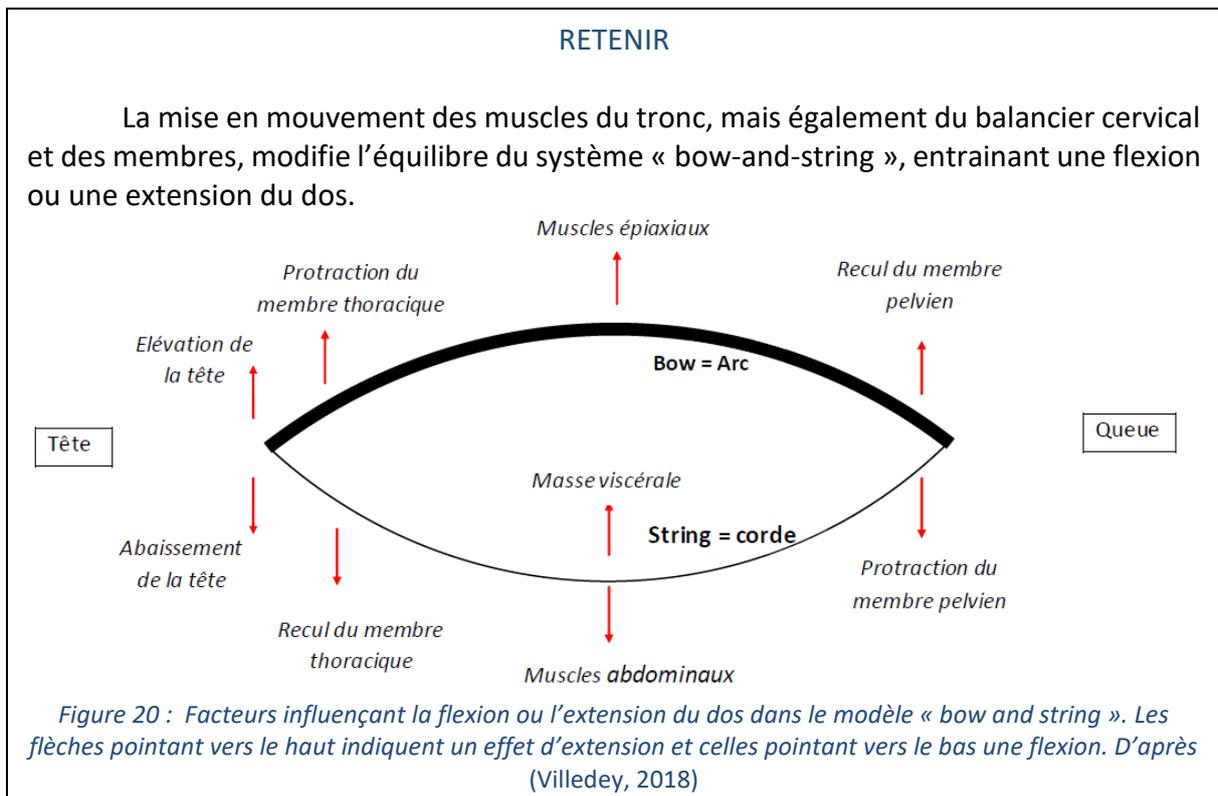


Figure 20 : Facteurs influençant la flexion ou l'extension du dos dans le modèle « bow and string ». Les flèches pointant vers le haut indiquent un effet d'extension et celles pointant vers le bas une flexion. D'après (Villedéy, 2018)

II.A.3. ACTIVITE MUSCULAIRE ET BRAS DE LEVIER

Les muscles peuvent effectuer trois types de contractions, répondant à différentes fonctions (H. M. Clayton et al., 2013; H. M. Clayton & Back, 2013):

- La **contraction isométrique**, qui est une contraction du muscle à volume constant, sans déplacement Articulaire. Elle permet le maintien d'une position. Par exemple, elle permet la stabilisation de la colonne vertébrale.
- La **contraction isotonique concentrique**, qui réduit la longueur du muscle et modifie les angles articulaires. Elle joue un rôle majeur dans la propulsion.
- La **contraction isotonique excentrique**, qui se manifeste par un allongement du muscle, ce qui va limiter la fermeture de certains angles articulaires (Denoix, 2014) et avoir un rôle d'amortissement.

La contraction d'un muscle a différents effets selon le levier sur lequel il agit. En biomécanique, deux bras de leviers sont observés :

- Le **levier interappui**, pour lequel l'articulation sert d'appui, puisqu'elle se situe entre l'extrémité effectuant le déplacement le plus important et l'insertion musculaire. Le muscle produisant la force permet un mouvement rapide et ample. Ce levier s'illustre principalement dans les mouvements de propulsion et de détente (contraction musculaire concentrique) et dans l'amortissement (contraction musculaire excentrique).
 - *Exemple* : action lors de la contraction du muscle triceps brachial s'insérant sur l'olécrane sur l'ulna.
- Le **levier interpuissant**, pour lequel c'est le lieu d'action de la force musculaire qui est situé entre l'extrémité du segment effectuant le déplacement le plus important et l'articulation étudiée. Il est économique, car la pression articulaire est modérée et la vitesse de déplacement est moyenne. Il est surtout utilisé pour les phases de soutien pour ramener le membre.
 - *Exemple* : action du muscle biceps brachial sur le radius lors de sa contraction.

II.A.4. STRUCTURE IMPLIQUEES DANS LES MOUVEMENTS DU DOS DU CHEVAL

II.A.4.1. L'EXTENSION DE LA COLONNE VERTEBRALE

L'extension de la colonne vertébrale thoraco lombaire repose sur la contraction concentrique des muscles extenseurs qui agissent en rapprochant les processus épineux thoraco-lombaires. L'extension de l'articulation lombo-sacrale qui l'accompagne, résulte de l'action concomitante du muscle glutéal moyen (Denoix, 2014).

II.A.4.2. LA FLEXION DE LA COLONNE VERTEBRALE

La flexion de la colonne vertébrale, et en particulier des régions thoraco-lombaire et lombo-sacrée, est permise par la contraction concentrique des muscles de la paroi de l'abdomen. Les muscles de la région sous-lombaire fléchissent l'articulation de la hanche, l'articulation lombo-sacrée et une portion lombaire de la colonne vertébrale. L'engagement des postérieurs est donc grandement dépendant de l'action de ces muscles (Denoix, 2014).

II.A.4.3. LA LATÉROFLEXION DE LA COLONNE VERTEBRALE

Les mouvements de latéroflexion sont consécutifs à la contraction concentrique asymétrique des muscles fléchisseurs ou extenseurs de la colonne vertébrale. Dans la région thoraco-lombaire, cette latéroflexion est due à la contraction unilatérale du muscle *erector spinae* et des muscles obliques de l'abdomen (Denoix, 2014).

II.A.4.3. LA ROTATION AXIALE DE LA COLONNE VERTEBRALE

La portion la plus caudale de la colonne vertébrale thoraco-lombaire est sujette à des rotations d'amplitude importante, tandis qu'en la région lombaire caudale, les rotations sont relativement limitées. Les mouvements de rotation sont la conséquence d'un phénomène passif d'appui asymétrique sur les quatre membres mobilisant la contraction excentrique des muscles juxta-vertébraux et des muscles obliques de l'abdomen, ou bien d'un phénomène actif via leur contraction musculaire concentrique (Denoix, 2014).

II.B. LES ALLURES

II.B.1. NOTION D'ALLURE ET DE FOULEE

Une **allure** se définit comme étant la répétition cyclique de mouvements des membres. Elle peut être **symétrique** lorsque le poser des pieds gauches et droits, antérieurs et postérieurs sont régulièrement espacés dans le temps. Elle peut se composer de la répétition de mouvements par **bipèdes latéraux** - paire composée de l'antérieur et du postérieur du même côté du cheval - ou **diagonaux** - paire composée par un membre antérieur et le membre postérieur du côté opposé (exemple : bipède diagonal droit correspond à l'antérieur droit et au postérieur gauche) (Leach et al., 1984).

La **foulée** est le cycle complet de répétition d'une série de mouvements d'un membre caractéristique d'une allure particulière. Elle peut être caractérisée par :

- Sa **longueur** : distance horizontale parcourue au cours d'une foulée, entre les deux poser consécutifs d'un même membre.
- Sa **durée** : temps nécessaire à la réalisation d'une foulée.
- Sa **fréquence** : nombre de répétitions de la foulée par unité de temps.

La **phase de support** est la période de la foulée pendant laquelle au moins un membre est en contact avec le sol. Le support peut être unipodal, bipodal, tripodal ou quadrupédal selon le nombre de membre en contact avec le sol. En fonction de l'allure, elle peut être suivie par une phase de **suspension** : Période de la foulée pendant laquelle les quatre membres sont au soutien, aucun membre n'est en contact avec le sol (Leach et al., 1984).

Les membres alternent donc entre des **phases d'appui**, période pendant lesquelles ils sont en contact avec le sol, et des **phases de soutien** pendant lesquelles ils ne sont pas en contact avec le sol. Ces deux phases sont séparées par le **breakover**, qui marque la fin de la phase d'appui d'un membre, commençant au départ des talons ou *Heel-off*, à partir duquel les talons ne sont plus en contact avec le sol, et finissant au départ de la pince, ou *Toe-off*, à partir duquel le sabot, et plus particulièrement la pince, n'est plus en contact avec le sol. Le terme de **protraction** désigne l'avancée d'une partie du cheval crânialement. Pour un membre, elle est maximale lors du poser du sabot au sol. A l'inverse, la **rétraction** est un mouvement d'une partie du cheval caudalement. La rétraction d'un membre est maximale lors du départ de la pince (Back & Clayton, 2013).

Les articulations du cheval présentent alternativement des **extensions**, quand l'angle articulaire augmente, et des **flexions**, quand l'angle articulaire diminue. Lorsque ces variations sont extrêmes, elles peuvent conduire à des lésions. On parle alors respectivement **d'hyperextension** et **d'hyperflexion**.

II.B.2. LE PAS

II.B.2.1. MECANISME DU PAS

Le pas est une allure marchée, symétrique, à quatre temps égaux sans temps de suspension, avec des périodes de chevauchement des phases d'appui de chacun des membres. C'est l'allure naturelle la plus lente du cheval, avec une vitesse moyenne de 7 km/h environ (Carro, 2016).

Le pas se décompose successivement avec : le levé de l'antérieur gauche, puis le levé du postérieur droit, le poser de l'antérieur gauche, le levé de l'antérieur droit, puis le poser du postérieur droit, le levé du postérieur gauche, le poser de l'antérieur droit, le levé de l'antérieur gauche et enfin le poser du postérieur gauche (Leach et al., 1984; Villedey, 2018).

Les variations de vitesse du pas passent par des modifications de la longueur de la foulée (H.-M. Clayton, 1995).

A cette allure, la ligne du dessus effectue des mouvements d'ondulation qui s'observent aisément au niveau du balancier cervico-céphalique, mais aussi avec la montée alternative du garrot et de la croupe.

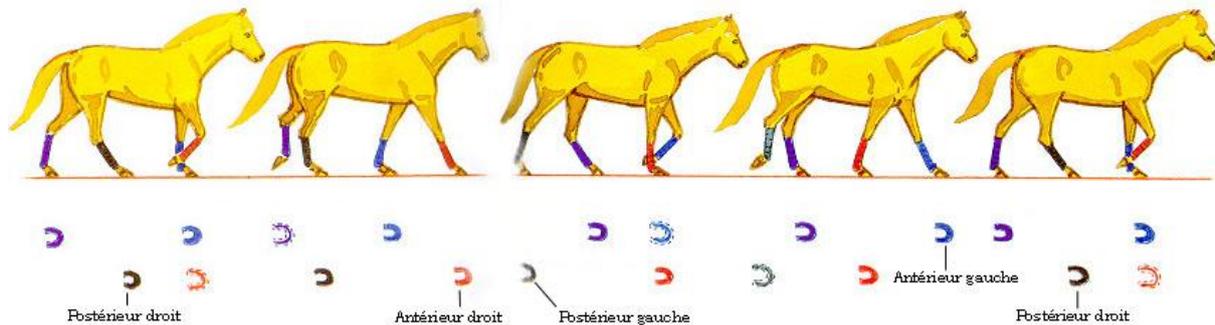


Figure 21 : Décomposition du mécanisme du pas. Les empreintes sont représentées en trait plein lorsque le membre est à l'appui, en trait discontinu lorsqu'il est au soutien. D'après (FFE, 1994)

II.B.2.2. BIOMECHANIQUE DU DOS AU PAS

La biomécanique du dos du cheval au pas et au trot a été étudiée par cinématique tridimensionnelle par Faber *et al.* en 2001 à l'aide de marqueurs osseux implantés à des endroits stratégiques de la ligne du dos. Dans cette étude, les mouvements angulaires des vertèbres (AMP = *angular motion pattern*) ont été mesurés et ont permis de décrire les mouvements des vertèbres les unes par rapport aux autres. L'hypothèse est émise que les mouvements du dos sont générés par les membres postérieurs. De fait, les mouvements de flexion et d'extension du dos sont causés par la mobilisation symétrique des membres postérieurs. La latéroflexion et la rotation axiale sont provoquées par le mouvement opposé des deux postérieurs (Hodgson et al., 2014).

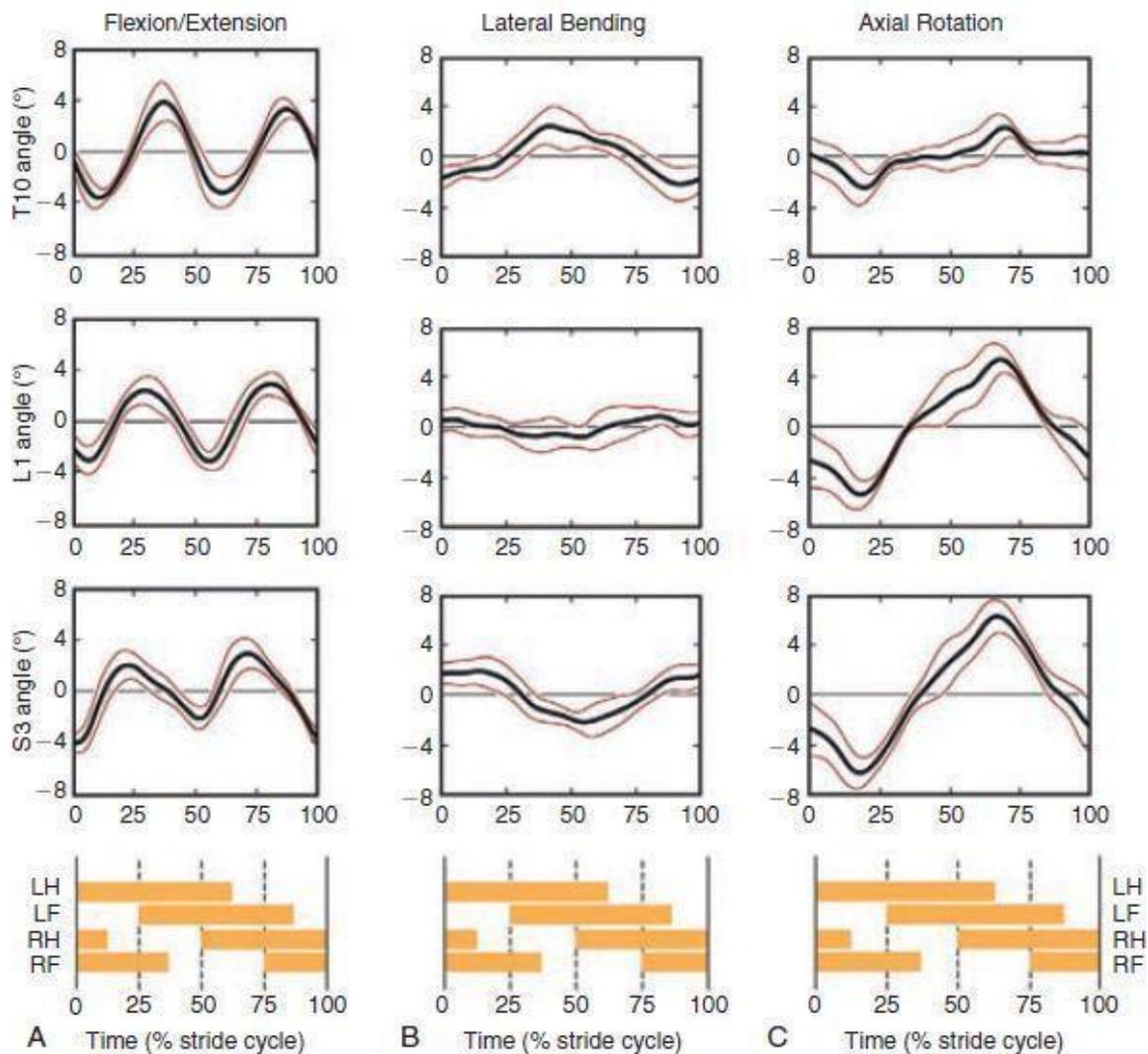


Figure 22 : Mouvements de flexion-extension (à gauche), de latéroflexion (au milieu) et de rotation axiale (à droite) des vertèbres T10, L1 et S3 pendant une foulée complète de pas sur tapis roulant. Le début de la foulée correspond au poser du pied postérieur gauche. Les barres pleines sous les graphiques indiquent les phases d'appui de chaque membre (LH = postérieur gauche, LF = antérieur gauche, RH = postérieur droit, RF = antérieur droit). D'après (Faber, Johnston, et al., 2001)

- **Mouvements de flexion-extension**

La région thoraco-lombaire subit deux cycles de flexion et d'extension par foulée. La flexion et l'extension étant générées par les membres postérieurs, elles commencent caudalement avant de se propager crânialement. Au début du poser du postérieur gauche, le dos est en extension (région thoracique en rotation positive et région sacrée en rotation négative sur la figure 23). L'extension continue jusqu'à 15% de la foulée, avant de s'inverser en flexion. A 40 % de la foulée, le dos est à nouveau en extension, avant de passer en flexion après 60% de la foulée.

L'amplitude de mouvement est plus importante sur l'articulation lombo-sacrée que sur les segments thoraciques), mais ne dépasse pas 8° en moyenne (Hodgson et al., 2014).

- **Mouvements de latéoflexion**

Sur la figure 22, la courbe représentatrice de la latéoflexion est une courbe périodique simple. Il y a une latéoflexion à droite et à gauche au cours de chaque foulée, expliquée par le mécanisme suivant :

- La protraction d'un postérieur et la rétraction d'un antérieur provoquent une flexion de la colonne du côté de ces membres
- La propulsion d'un postérieur et la protraction d'un antérieur provoquent une extension de la colonne du côté de ces membres
 - *Exemple* : Au pas, lors de la protraction du postérieur gauche, il y a rétraction de l'antérieur gauche, protraction de l'antérieur droit et propulsion du postérieur droit, induisant une latéoflexion à gauche.

L'amplitude de mouvement est maximale au niveau du pelvis et minimale en régions thoracique caudale et lombaire crâniale (Faber, Schamhardt, Van Weeren, & Barneveld, 2001) et le maximum est atteint lors du contact au sol du postérieur ipsilatéral (H.-M. Clayton & Hobbs, 2017).

- **Mouvements de rotation axiale**

De même, il y a une rotation axiale à droite et à gauche par foulée, qui accompagne la latéoflexion.

L'amplitude de mouvement est plus importante en région caudale qu'en région crâniale (Faber *et al.*, 2001c), et le maximum de rotation se produit lors du poser du postérieur controlatéral (Clayton & Hobbs, 2017).

- **Les mouvements du balancier cervico-céphalique**

Au pas, le balancier de l'encolure est visible, avec une élévation et un abaissement deux fois par foulée. L'encolure est relevée au maximum lors du contact d'un antérieur avec le sol puis abaissée à la moitié de sa phase d'appui. La tête et l'encolure présentent également des mouvements oscillatoires latéraux qui améliorent l'amplitude de mouvement des antérieurs.

II.B.3. LE TROT

II.B.3.1. MECANISME DU TROT

Le trot est une allure naturelle sautée, symétrique, à deux temps égaux séparés par une phase de suspension. Elle a une vitesse intermédiaire, d'environ 15 km/h, bien que de grandes variations de vitesse soient possibles suivant la cadence et l'amplitude.

Elle se décompose comme la succession du poser des deux bipèdes diagonaux : d'abord le poser du diagonal droit, composé de l'antérieur droit et du postérieur gauche, puis son levé, un temps de projection, puis le poser du diagonal gauche, composé de l'antérieur gauche et du postérieur droit) et son levé, et enfin un nouveau temps de projection.

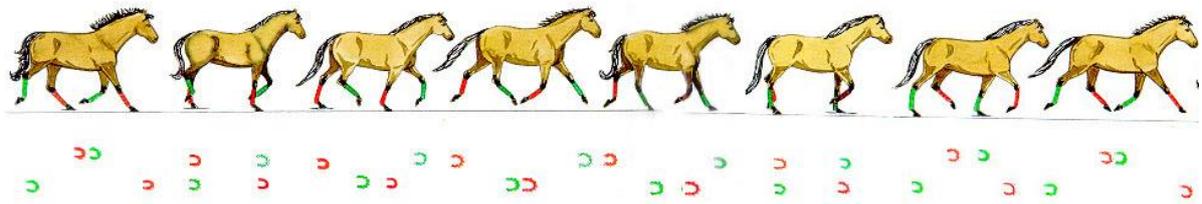


Figure 23 : Décomposition du mécanisme du trot. Les empreintes sont représentées en trait plein lorsque le membre est à l'appui, en trait discontinu lorsqu'il est au soutien. D'après (FFE, 1994)

Au trot, l'encolure présente un mouvement de balancier moins marqué qu'au pas. En revanche, la ligne du dessus du cheval se lève et qui s'abaisse lors de la projection et des poser. Le dos participe peu à la locomotion en tant que tel mais sa rigidification augmente son efficacité.

II.B.3.2. BIOMECHANIQUE DU DOS AU TROT

Les courbes représentatives des mouvements de flexion-extension et de rotation axiale au trot ont une forme sinusoïdale double alors que la latéroflexion ne comporte qu'une oscillation (Figure 22). Au trot, l'activité musculaire est plus importante qu'au pas, ce qui permet de limiter les mouvements de la colonne vertébrale (Faber *et al.*, 2001).

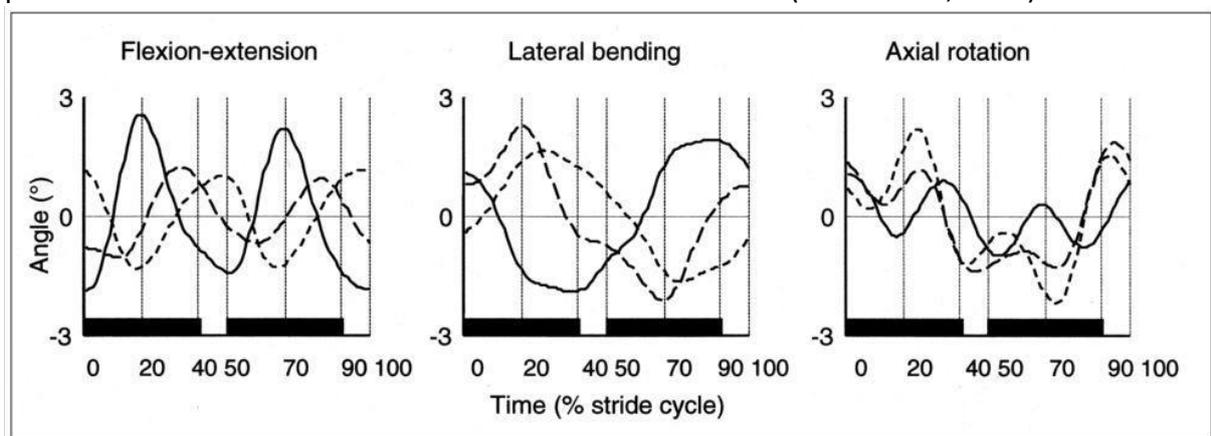


Figure 24 : Mouvements angulaires vertébraux moyens pour des chevaux au trot sur un tapis roulant (à 4 m/s) pendant une foulée complète. Le cycle de foulée commence au contact du sabot du postérieur gauche, les barres noires indiquent la phase d'appui. Ligne continue : T10, ligne en tirets : L1, ligne en pointillés : S3. D'après (Faber, Johnston, et al., 2001)

- **Mouvements de flexion-extension**

Au trot, la mesure des mouvements angulaires vertébraux du dos (Figure 24) forme une courbe sinusoïdale alternant flexion-extension, avec une oscillation par diagonal à l'appui (Figure 25).

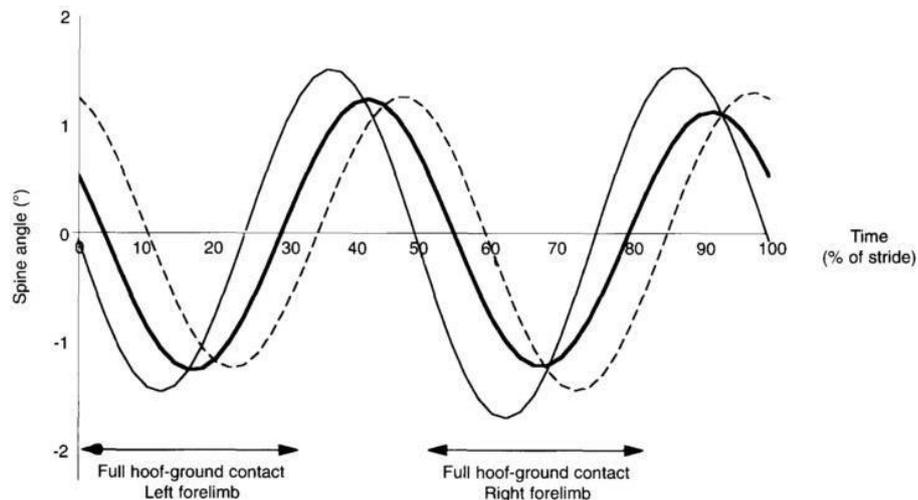


Figure 25: Mouvements de flexion-extension dorsale d'un cheval sain au trot. Ligne fine : angle thoracique, ligne épaisse : angle thoraco-lombaire, ligne pointillée : angle lombo-sacré. D'après (Audigié et al., 1999)

Les structures mises en jeu par ces mouvements sont régies par le fonctionnement suivant :

- Pendant la première partie de la phase d'appui, le dos subit une extension passive, qui est maximale environ à mi-appui. Elle est causée par le poids des viscères abdominaux. Le muscle droit de l'abdomen, en se contractant de manière excentrique, soutient les viscères et limite ainsi l'extension (Audigié et al., 1999; Denoix, 2014).
- Pendant la deuxième moitié de la phase d'appui, le dos se fléchit, pour atteindre un maximum de flexion pendant la phase de soutien. Cette flexion est due à l'inertie des viscères abdominaux liée à la propulsion associée à l'élasticité des ligaments vertébraux, et à la protraction du membre pelvien. Le muscle long dorsal limite la flexion et stabilise la colonne vertébrale thoracique et lombaire (Audigié et al., 1999).
- Pendant la deuxième partie de la phase de soutien, le muscle droit de l'abdomen est inactif (Wennerstrand, 2008).

L'extension et la flexion maximales sont d'abord atteintes par la portion thoracique crâniale, avant d'atteindre les régions thoraco-lombaire et lombo-sacrée. Ces mouvements restent discrets et d'amplitude de chacun est inférieure à 4° (Audigié et al., 1999). Les mouvements sont répétés de façon similaire pendant la phase d'appui de l'autre diagonal.

- **Mouvements de latéoflexion**

La latéoflexion prend une forme sinusoïdale simple (Figure 24), avec :

- Une latéoflexion à droite en fin d'appui du diagonal droit, suite à la contraction asymétrique des muscles obliques et du muscle ilio-costal (Denoix, 2014). Ce mouvement de latéoflexion est limité par le muscle longissimus des lombes (*longissimus lumborum*) (Wennerstrand, 2008).

- Une latéroflexion à gauche à l'appui du diagonal gauche.
→ *Exemple* : Lorsque l'antérieur gauche, à l'appui, se recule par rapport au corps, une flexion thoracique et lombaire s'opère du côté de cet antérieur.

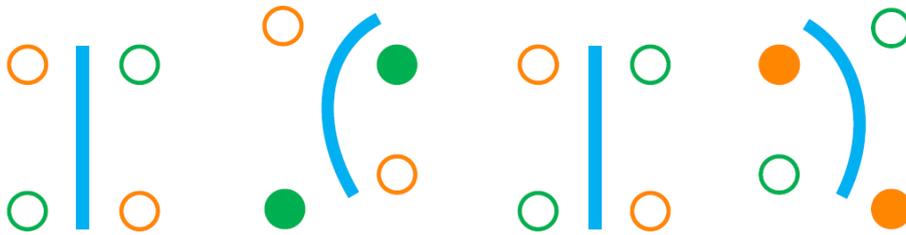


Figure 26 : Représentation schématique simplifiée de la latéroflexion du dos en fonction du poser des bipèdes diagonaux au trot. L'incurvation du rachis a été exagérée dans un but didactique. Les points représentent les pieds à l'appui, les cercles les pieds au soutien. Le rachis est matérialisé par le trait bleu, le bipède diagonal gauche par les cercles et les points orange, le bipède diagonal droit par les points et les cercles violets. D'après (Chenot-Hervillard, 2015)

L'amplitude de mouvement de latéroflexion est similaire pour toutes les vertèbres étudiées (Faber, Johnston, et al., 2001).

- **Mouvements de rotation axiale**

Lors du poser d'un bipède diagonal, un seul antérieur est à l'appui, et la suspension du thorax est maintenue principalement par les muscles du côté du membre à l'appui. Il y a donc une rotation passive du thorax avec inclinaison des processus épineux vers le membre au soutien et inclinaison du sternum vers le membre à l'appui. La contraction des muscles du tronc va limiter ce mouvement (Denoix, 2014). Les transitions entre rotation à droite et à gauche interviennent fin de la phase d'impact, au moment de propulsion maximale et au décollage.



Figure 27: Représentation schématique simplifiée de la rotation du rachis en vue caudale selon la position des bipèdes diagonaux d'un cheval a. à l'arrêt sur une surface plane b. au trot en ligne droite sur une surface plane. Le schéma passe par une coupe transversale imaginaire, dans l'axe des membres pelviens. La mise au soutien du membre pelvien provoque la rotation de la partie caudale du rachis ; la mise au soutien du membre antérieur provoque la rotation en sens inverse de la partie crâniale du rachis. Les points représentent les pieds à l'appui, les cercles les pieds au soutien. La partie caudale du rachis est matérialisée par le trapèze bleu clair, la partie crâniale du rachis par le trapèze bleu foncé, le bipède diagonal gauche par les cercles et les points orange, le bipède diagonal droit par les points et les cercles violets. Les proportions ne sont pas respectées. D'après (Chenot-Hervillard, 2015)

- **Mouvements du balancier cervico-céphalique**

Au trot, l'encolure est stabilisée verticalement, ce qui explique l'absence de mouvement du balancier cervico-céphalique à cette allure.

II.B.4 LE GALOP

II.B.3.2. MECANISME DU GALOP

Le galop est une allure naturelle asymétrique basculée à trois temps inégaux suivie d'une phase de suspension. On distinguera deux galops : un à droite, un à gauche, suivant l'ordre de poser des membres. C'est l'allure naturelle la plus rapide du cheval, avec une vitesse moyenne de 20 à 30 km/h environ, bien qu'il existe d'importantes variations de rythme (galop rassemblé, galop de travail, galop de course ...) et que de grandes variations individuelles soient observables.

Dans le cas d'un galop à droite, elle se décompose comme suit : poser du postérieur gauche, poser du bipède diagonal gauche, lever du postérieur gauche, poser de l'antérieur droit, lever du bipède diagonal gauche, lever de l'antérieur droit, suivi d'un temps de suspension. Il est à noter que le poser du diagonal peut être dissocié, lors de « galop à 4 temps », avec l'antérieur du diagonal externe se posant avant le postérieur.



Figure 28 : Décomposition du mécanisme du galop à gauche. Les empreintes sont représentées en trait plein lorsque le membre est à l'appui, en trait discontinu lorsqu'il est au soutien. D'après (FFE, 1994)

Au galop, la participation du rachis à la locomotion est particulièrement importante. Les mouvements de flexion-extension de la colonne vertébrale sont synchronisés avec le mouvement de bascule du corps du cheval. Il y a flexion de la région thoraco-lombaire lorsque les postérieurs s'engagent et extension lors du temps de suspension. Le mouvement de balancier de l'encolure accompagne ces mouvements.

II.B.3.2. BIOMECANIQUE DU DOS AU GALOP

- **Mouvements de flexion-extension**

Les mouvements vertébraux lors du galop sont majoritairement des mouvements de flexion et extension actifs, et forment une courbe monophasique (M Faber et al., 2001).

La contraction concentrique du muscle *erector spinae* et du muscle fessier moyen entraîne une extension thoraco-lombaire lors de la phase de propulsion des postérieurs. (Figure 24). Après la pose du bipède diagonal, le balancier cervico-céphalique s'abaisse passivement et activement par la mobilisation des muscles scalènes et splénius. Cette flexion de l'encolure met en tension le ligament supra-spinal, ce qui permet la transmission de la propulsion. (Denoix, 2014)

La contraction des muscles abdominaux et du muscle ilio-psoas crée une flexion thoraco-lombaire permettant l'engagement des postérieurs sous la masse lors de la phase de suspension. Une élévation du balancier cervico-céphalique survient pendant la flexion dorsale, grâce au muscle *longissimus dorsi* et au relâchement du ligament supraspinal (Denoix, 2014)

- **Mouvements de latéoflexion**

Au galop, les mouvements de latéoflexion de l'encolure sont de grande amplitude, notamment en région thoracique. T10 subit une latéoflexion du côté du galop correspondant lors de la flexion cervicale, puis du côté opposé lors de la phase de suspension suite à l'engagement du postérieur sous la masse. (M Faber et al., 2001)

→ *Exemple* : Au galop à droite, à l'appui du diagonal gauche, les vertèbres thoraciques subissent une latéoflexion à droite, puis une latéoflexion gauche durant l'ensemble de la phase de suspension.

- **Mouvements de rotation axiale**

Au galop à droite, la contraction muscle *longissimus dorsi* au départ de l'antérieur droit entraîne une rotation gauche des vertèbres thoraciques et lombaires (M Faber et al., 2001). Les vertèbres T10, L1 et S3 suivent des mouvements de rotation similaires entre la propulsion de l'antérieur droit et le posé du diagonal gauche (Figure 29).

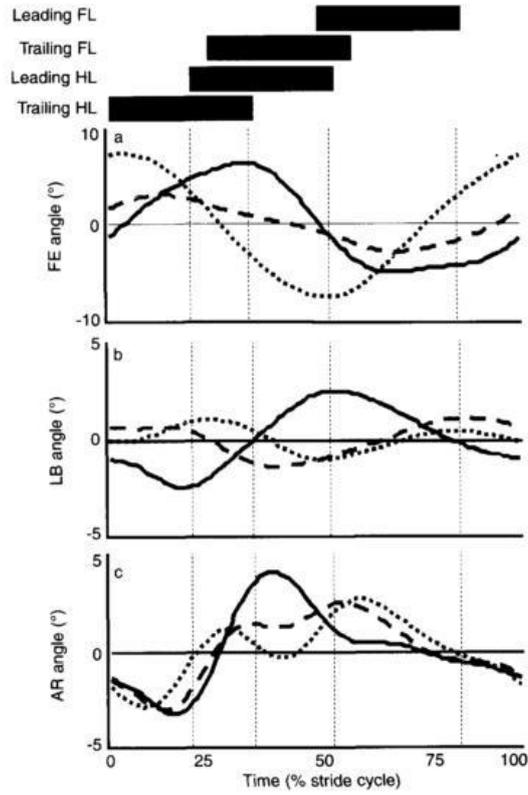


Figure 29 : Mouvements angulaires au galop (7,3m/s) sur une foulée. Ligne continue : angle thoracique en T10 ; ligne pointillée : angle lombo-sacré en S3 ; ligne en tirets : angle thoraco-lombaire en L1. « FE angle » : angle de flexion-extension ; « LB angle » : latéroflexion ; « AR angle » : rotation axiale. D'après (M Faber et al., 2001)

III. METHODES D'ETUDE DE LA LOCOMOTION DU CHEVAL

La technique la plus simple pour évaluer la locomotion du cheval de façon qualitative et empirique est l'examen visuel par un observateur expérimenté, comme un juge lors d'une reprise de dressage ou un vétérinaire lors d'une consultation de boiterie. Cependant, cette méthode est, par définition, subjective et dépendante de l'expérience propre de l'observateur, ce qui peut entraîner des divergences d'opinion quant à la locomotion d'un même cheval. Les analyses scientifiques nécessitent des données quantitatives précises pour décrire les mouvements, et doivent donc reposer sur des méthodes qui permettent de s'affranchir de cette subjectivité (H. M. Clayton & Schamhardt, 2001).

Les mouvements du cheval résultent de mobilisation de son squelette grâce à la mise en jeu de l'ensemble des muscles. Une modélisation simple du squelette consiste à le représenter par un ensemble de segments articulés les uns aux autres. L'analyse des allures des chevaux repose donc sur les lois de la mécanique newtonienne classiquement employées pour des objets inanimés, à la différence que les équations mécaniques qui déterminent les mouvements d'un ensemble de segments de corps articulés sont beaucoup plus compliquées (Barrey, 1999). Puisque les mouvements du cheval répondent à la mécanique newtonienne, il existe deux approches complémentaires pour étudier le corps en mouvement : la **cinématique** et la **cinétique**, que nous développerons dans la partie qui suit.

III.A. LA METHODE CINEMATIQUE

III.A.1. ANALYSE EN DEUX OU TROIS DIMENSIONS

L'approche cinématique consiste à filmer les animaux avec une ou plusieurs caméras afin d'analyser les caractéristiques de mouvement de chaque segment du corps. Les trajectoires des articulations et des segments du corps en mouvement peuvent être mesurées sur les images successives prises à un intervalle de temps constant. La plupart des études de locomotion équine montrent une analyse du mouvement en deux dimensions, pour laquelle la présence d'une seule caméra est suffisante, à condition d'évaluer le cheval sur une ligne droite perpendiculaire à l'axe de la caméra, car un écart à cette ligne peut entraîner des distorsions de mesures et des erreurs d'interprétation. L'analyse tridimensionnelle nécessite la présence d'un minimum de quatre caméras avec un angle de vue suffisant pour inclure l'ensemble des marqueurs. Cette dernière permet de s'affranchir du tracé effectué par le cheval (Barrey, 1999). Une limite de ces systèmes d'analyse de démarche sophistiqués est la vue de champ restreinte. Cela ne représente qu'environ 5 m, ce qui correspond à quelques pas de marche ou de trot.

III.A.2. CHOIX ET UTILISATION DES MARQUEURS

III.A.2.1. Marqueurs cutanés

La plupart des analyses cinématiques utilisent des marqueurs collés sur le corps. Les marqueurs sont composés de petits cercles blancs ou des demi-sphères collés sur la peau. Leur taille varie avec la résolution de la caméra, une faible définition nécessitant des marqueurs de plus grande taille. Les marqueurs ont pour but d'indiquer la position du centre de rotation de l'articulation sous-jacente.

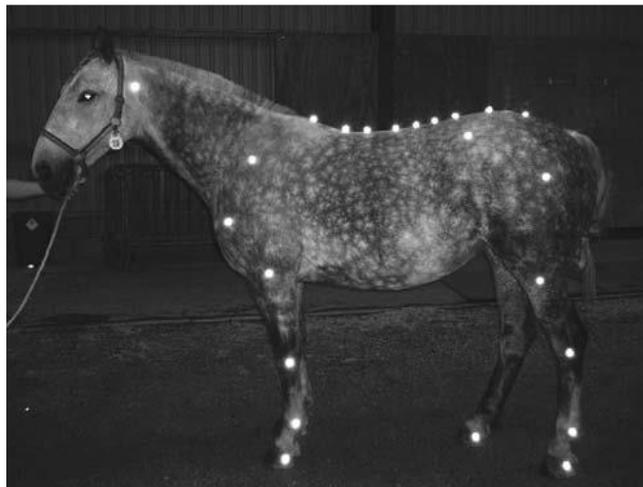


Figure 30 : Marqueurs cutanés sphériques réflecteurs de lumière infrarouge de 19 mm de diamètre utilisés pour une étude de la cinématique de la ligne du dos du cheval. Source (Gómez Álvarez, L'Ami, et al., 2008)

Les marqueurs doivent être positionnés sur le cheval arrêté au carré, portant son poids sur ses quatre membres, car un changement de position ou d'appui sur un membre entraîne une modification de la position relative de la peau et de l'os sous-jacent. La mise en place des marqueurs repose sur la palpation des repères anatomiques. Le choix du nombre et de la position des marqueurs dépend de ce qui est à étudier.

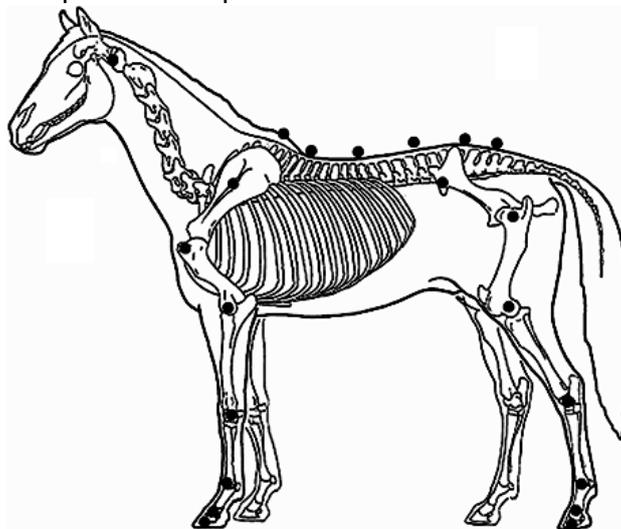


Figure 31 : Emplacements des marqueurs les plus communément employés lors d'étude cinématiques. Source (H. M. Clayton & Schamhardt, 2001)

Les emplacements le plus communément employés se situent (Orange, 1995):

- Sur la ligne du dessus, au niveau de la nuque, du sommet du garrot, du bas du garrot, de l'articulation thoraco-lombaire, du sommet de la croupe et du milieu de la croupe.
- Sur le membre antérieur, au niveau des articulations de l'épaule, du coude, du carpe, et du boulet, ainsi que sur la couronne et le sabot.
- Sur le membre postérieur, au niveau du *tuber coxae*, du grand trochanter, des articulations du grasset, du jarret et du boulet, ainsi que sur la couronne et le sabot.

III.A.2.2. Marqueurs fixés aux os

L'utilisation des marqueurs cutanée peut se révéler être une source d'imprécision, car les déplacements de la peau sur le squelette pendant la locomotion génèrent des artefacts, en particulier dans les articulations proximales (van Weeren et al., 1990). Une méthode plus précise mais également plus invasive permet de s'affranchir des déplacements de la peau en utilisant des marqueurs fixés chirurgicalement à l'os à l'aide de broches intracorticales de Steinman.

Grâce à des marqueurs fixés à des broches intracorticales, Faber *et al* date ont pu évaluer la validité de l'utilisation de marqueurs cutanés pour étudier la cinématique de la colonne vertébrale en région thoraco-lombaire. La comparaison des données bidimensionnelles obtenues à l'aide des marqueurs cutanés et des données tridimensionnelles fournies par les marqueurs osseux a permis d'établir que l'utilisation de marqueurs fixés à la peau permet un calcul valide de la cinématique de la colonne vertébrale au pas et au trot. Les marqueurs cutanés sont donc des outils suffisamment fiables pour être utilisés dans des études cliniques. Cependant, il faut rester prudent concernant l'interprétation des données obtenues à l'aide de marqueurs cutanés sur les mouvements de flexion latérale au pas (Faber, Schamhardt, Van Weeren, & Barneveld, 2001).

III.A.2.3. Utilisation d'émetteurs ultrasons

Certains systèmes d'étude cinématique reposent sur l'utilisation d'émetteurs d'ultrasons qui sont ensuite détectés par les capteurs munis de microphones positionnés sur le cheval. Ils utilisent ainsi le principe de triangulation ultrasonore permettant de détecter les coordonnées exactes de chacun des capteurs dans les trois dimensions de l'espace. Cette technique a été utilisée par exemple dans l'étude menée par Château et al sur l'élévation de la pince et des talons sur la cinématique des articulations interphalangiennes. Les marqueurs cinématiques ont été liés aux os sous-jacents par l'utilisation de broches intracorticales implantées dans l'os métacarpien III et les phalanges proximale et moyenne du membre antérieur gauche. Pour la phalange distale, la pointe de la broche a été soudée à une plaque vissée dans en face latérale de la paroi du sabot. Les émetteurs à ultrasons étaient associés à des marqueurs intra-osseux

(Chateau et al., 2006). L'utilisation d'ultrasons constitue également une méthode de mesure intéressante permettant de connaître en temps réel la position d'un segment.

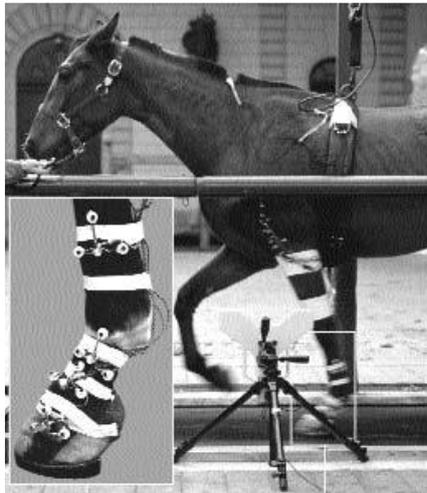


Figure 32: Photographie d'un cheval équipé de marqueurs cinématiques invasifs sur un tapis roulant, avec des émetteurs à ultrasons. Encart : Quatre triades de marqueurs apposées sur l'extrémité des broches intracorticales. Source (Chateau et al., 2006)

III.A.2.4. Utilisation de photodiodes

Un système d'analyse de mouvement plus sophistiqué utilise des marqueurs constitués de photodiodes (anthropomètre dynamique optoélectronique cartésien modifié CODA-3). L'avantage de ce système est sa bonne résolution (0,2–2,6 mm) en trois dimensions, sa fréquence d'enregistrement élevée (300Hz) et les possibilités de suivi automatique des marqueurs actifs (van Weeren et al., 1990). Cette technique est associée à des captures optiques, et sont malheureusement limitée au laboratoire avec tapis roulant.

III.A.3. VALIDITE DES DONNEES OBTENUES

L'analyse de la cinématique du dos chez le cheval peut fournir des données hautement reproductibles, ce qui permet d'envisager une utilisation clinique, comme l'a montré Faber et al. Dans cette étude, un degré élevé de répétabilité entre les foulées et entre les jours a été observé dans les paramètres spatio-temporels et dans les diagrammes temps-angle des vertèbres thoraciques et lombaires, du sacrum et des postérieurs au pas et au trot (Faber et al., 2010).

RETENIR

La cinématique est une approche descriptive qui étudie des modifications de la position des segments du corps dans l'espace pendant une période de temps donnée. Elle a énormément contribué à l'étude de la locomotion et est actuellement une des techniques principales dans l'étude du mouvement. Elle permet de décrire quantitativement le mouvement par caractéristiques spatio-temporelles des segments du corps (distances, angles, vitesse, accélération) et des foulées (longueur, fréquence, rythme et symétrie).

III.B. METHODE CINETIQUE

III.B.1. ANALYSE DE LA FORCE DE REACTION DU SOL

Les forces sont donc responsables du mouvement de tout corps et de ses différents segments. Dans le cadre de l'étude du mouvement de la locomotion d'un cheval, on distingue des forces internes au cheval (musculaires, tendineuses etc.) et des forces externes (de contact, de gravité etc.) liées à son environnement.

L'étude cinétique du mouvement du cheval peut reposer sur l'évaluation des forces mises en jeu entre le pied du cheval et le sol. De ces données, il est possible de déterminer les forces auxquelles sont soumis les différents segments du membre du cheval. Différentes techniques sont employées pour obtenir la valeur de la force de réaction au sol (GRF ou Ground Reaction Force) produite par le sol en réponse à l'appui du pied du cheval lors du posé d'un membre.

III.B.1.1. Utilisation d'une plateforme de force

Les plateformes de force sont des outils utilisés dans les principaux centres de recherche sur la locomotion. Ces dispositifs permettent d'enregistrer des données mécaniques fournies par le poser du membre du cheval, puis de les transformer en données électriques par l'intermédiaire de capteurs de force ou de jauges de contraintes. Elles sont constituées de deux plaques métalliques séparées par des capteurs ou jauges de contrainte. La plaque supérieure sur laquelle le cheval réceptionne est généralement revêtue d'un tapis antidérapant pour éviter qu'il ne glisse.

Ce principe de fonctionnement a été adapté à des tapis roulants, ce qui permet d'enregistrer des données sur plusieurs foulées.

III.B.1.2. Utilisation de capteurs intégrés aux fers

Une alternative aux plateformes de force est le recours aux fers dynamométriques, qui sont des fers spécialement conçus pour accueillir des capteurs de force. Les capteurs mesurent la déformation mécanique et transforment les données en information électrique à chaque poser du membre.

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

L'un des principaux inconvénients de l'utilisation de tels fers est le poids et l'épaisseur relativement importants par rapport à un fer classique qui pourraient induire un biais de mesure lors de l'impact du pied au sol (Barrey, 1999).

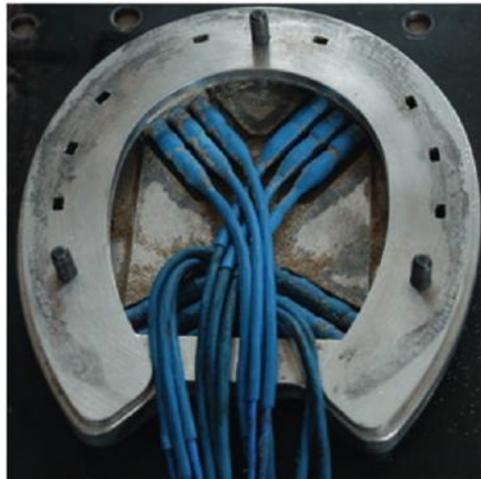


Figure 33: Photographie d'un fer dynamométrique utilisé dans une étude de la locomotion du cheval. (Chateau et al., 2010)

III.B.2. L'ACCELEROMETRIE

L'**accélérométrie** est une technique consistant à déterminer des variations de vitesse linéaire dans le temps grâce à des capteurs fixés à des segments du corps du cheval. Ces capteurs permettent d'obtenir l'accélération des différents segments du corps et d'en déduire les déplacements de certaines parties du corps. L'usage d'accéléromètres est intéressant sur le terrain car les capteurs sont de petite taille et renseignent aisément sur les caractéristiques du mouvement. Ils ne nécessitent qu'un matériel restreint et les logiciels informatiques transformant les données brutes ont été conçus de sorte à être facilement utilisables par des praticiens.

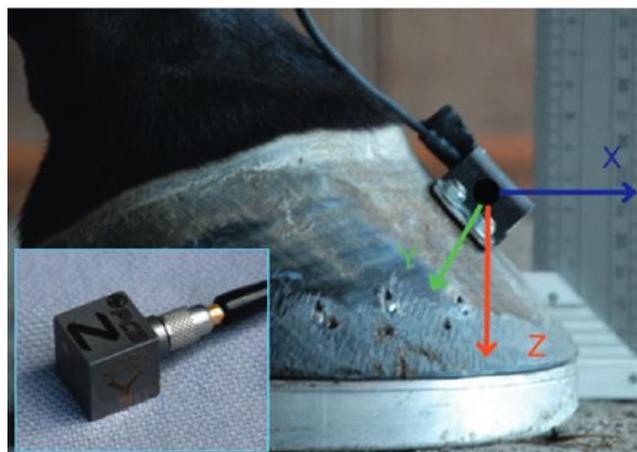


Figure 34 : Positionnement d'un accéléromètre sur la paroi d'un sabot. (Chateau et al., 2010)

Des études reposant sur la comparaison des résultats issus de l'accélérométrie et de la cinématique ont montré que l'utilisation d'accéléromètres était une technique d'une précision acceptable dans l'étude de la locomotion de la ligne du dos du cheval (Warner et al., 2010).

III.B.3. ELECTROMYOGRAPHIE

L'électromyographie permet d'évaluer la composante musculaire mise en jeu dans les mouvements étudiés en mesurant l'activité électrique des muscles. Cette technique repose sur l'utilisation d'électrodes de surface, peu invasives, ou des électrodes insérées dans le muscle, qui ont une meilleure précision sur la mesure de l'amplitude du signal électrique. Couplée aux méthodes de cinématiques ou accélérométriques, elle permet de mettre en relation l'activité électrique d'un muscle avec son intervention biomécanique dans le mouvement. Ref ?

RETENIR

La cinétique, ou dynamique, est l'étude de la cause du mouvement, qui peut s'expliquer par la force appliquée sur le corps, sa distribution de masse et ses dimensions. La cinétique s'intéresse aux forces, aux accélérations, à l'énergie et au travail qui sont également en relation avec des variables cinématiques telles que l'accélération et la vitesse.

IV. INFLUENCE DU SOL SUR LA LOCOMOTION DU CHEVAL

La pratique de l'équitation amène le cheval à rencontrer différentes surfaces de travail, que ce soit dans le domaine des courses, du loisir ou du sport. Les pistes en herbe, en sable, en terre, ou bien d'asphalte présentent des caractéristiques différentes susceptibles d'influencer la locomotion du cheval. Nombre d'études de la locomotion du cheval ont été réalisées sur tapis roulant pour des raisons de praticité, ce qui est potentiellement un facteur de variation supplémentaire à prendre en compte dans l'interprétation des résultats.

IV.A. ETUDE DE LA LOCOMOTION SUR TAPIS ROULANT

L'utilisation du tapis roulant pour l'étude de la locomotion du cheval présente des avantages indéniables par rapport aux études sur piste. Elle permet notamment le contrôle de la vitesse de déplacement et le degré d'inclinaison du tapis, ce qui permet de faciliter la répétabilité des expériences, en imposant la même vitesse, afin d'évaluer l'influences d'autres facteurs sur la locomotion. Des études ont pourtant montré des différences entre la cinématique de la locomotion du cheval sur tapis roulant et sur piste (H. M. Clayton & Schamhardt, 2001).

Des séances d'habituations sont nécessaires avant que les chevaux ne se déplacent de façon régulière sur le tapis roulant, car les premières foulées sur le tapis roulant, sont significativement plus courtes et plus rapide que sur un sol classique. Le garrot et l'arrière-main sont abaissés, et le polygone de sustentation est augmenté afin de gagner en stabilité. Au trot, l'habituations au tapis roulant est assez rapide, puisque la cinématique du trot se stabilise en moyenne au bout de 3 séances de 5 minutes. Au pas, cette stabilisation est plus tardive, avec au moins 10 séances nécessaires (Buchner et al., 1994).

Des comparaisons entre la locomotion au sol et sur tapis roulant chez des chevaux trottant à la même vitesse ont montré que pour une même vitesse, la fréquence des foulées est diminuée et leur longueur est supérieure sur le tapis roulant (Barrey, 2004). Le tapis roulant a tendance à augmenter la rétraction des antérieurs, ce qui nécessite une tension plus importante sur le tendon fléchisseur profond du doigt pour le breakover (Buchner et al., 1994).

L'utilisation du tapis roulant permet aussi l'analyse des forces verticales de chaque membre à chaque allure, grâce à une plaque de force, lorsqu'elle est intégrée au tapis roulant, comme c'est le cas à l'Université de Zurich (Weishaupt et al., 2006).

IV.B. EFFETS BIOMECHANIQUES DES SOLS SUR L'APPAREIL LOCOMOTEUR DU CHEVAL

Des études, et en particulier les projets Sequisol (2007-2010) et Safetrack (2012-2015), ont permis d'évaluer les conséquences sur la locomotion du cheval de différentes pistes, en cherchant à établir un lien de cause à effet entre les caractéristiques d'une piste et l'apparition de lésions, et à déterminer comment ces caractéristiques modifient les contraintes sur l'appareil locomoteur (Crevier-Denoix, 2011; Crevier-Denoix et al., 2009, 2016). Environ 20 pistes aux structures et matériaux variés ont été comparées, à l'aide de données issues d'un trotteur attelé et d'un cheval monté, fournies par :

- Un fer dynamométrique 3D et un accéléromètre 3D fixés sur les pieds du cheval.
- Un capteur ultrasonore permettant d'estimer la force dans le tendon fléchisseur superficiel du doigt (FSD)
- Une ou deux caméras haute fréquence (600 à 1000 Hz) ;
- Un dispositif pour mesurer la vitesse du cheval (GPS sur le cheval monté).

IV.B.1. IMPORTANCE DE LA PISTE

IV.B.1.1. STRUCTURE DE LA PISTE

La structure d'une piste se divise en une couche superficielle, une couche intermédiaire, et une couche profonde (Crevier-Denoix, 2015a) :

- La **couche de travail** (entre 10 et 15 cm d'épaisseur environ), qui est la couche la plus superficielle, dont la souplesse conditionne la liberté de mouvement du pied.
- La **couche de fondation**, sous-jacente à la couche de travail, qui est moins souple et permet le drainage et la portance de la couche de travail. Une couche supplémentaire peut être rajoutée entre la couche de travail et la couche de fondation afin de les séparer mécaniquement, et d'éviter la descente de la première ou la remontée de la seconde.
- Le **fond de forme** (à 25 ou 30 cm de profondeur en général), constitué par le terrain naturel compacté sur lequel repose l'ensemble.

IV.B.1.2. IMPORTANCE DE LA PREPARATION DE LA PISTE

Le Projet Sequisol (Crevier-Denoix et al., 2009) a mis en évidence que les contraintes biomécaniques sur les membres sont significativement différentes selon qu'une piste en sable fibré soit compactée à l'aide d'un rouleau ou bien hersée. En effet, pour le premier antérieur à la réception d'un cheval après un obstacle de 1,20 m, le choc de l'impact et le freinage sont augmentés d'environ 50% sur le sol compacté. La répétition du passage de chevaux au même endroit entraîne un tassement du sol similaire à celui observé après le passage d'un rouleau. Le hersage de la piste doit donc être régulier pour que la piste conserve ses caractéristiques en matière d'amortissement.

IV.B.1.3. IMPORTANCE DE LA TENEUR EN EAU DU SABLE

Plusieurs études ont été menées dans des conditions de terrain, sur différentes pistes en sable sur la plage, afin d'évaluer l'influence de la teneur en eau du sable sur les paramètres de la foulée.

Dans l'étude de Château et al, le sabot avant droit de 4 chevaux trotteurs était équipé d'un accéléromètre triaxial et d'un fer à cheval dynamométrique. Les chevaux ont été conduits sur une plage de sable où 3 pistes de teneur en eau décroissante avaient été délimitées (de la mer au rivage): sable mouillé ferme, sable humide profond et sable sec profond. Une diminution de l'amplitude de la décélération verticale (et de la force) du sabot lors de l'impact sur une surface plus molle a été objectivée. De plus, une diminution de la décélération (et de la force) du freinage longitudinal sur des sols plus souples a pu être mise en évidence. Enfin, la longueur de la foulée était diminuée et la fréquence de la foulée était augmentée sur sol mou. Il apparaît donc que les surfaces en sable dont la teneur en eau est réduite réduisent les forces de choc et d'impact lors de l'atterrissage, tout en réduisant la longueur de la foulée et en augmentant la fréquence.

Dans les études de Crevier-Denoix et al, la comparaison des variables cinématiques, accélérométriques et dynamométriques mesurées lors de passages d'un trotteur sur la plage ont également permis de distinguer des effets significatifs de la teneur en eau du sol sur les paramètres de la foulée. Le premier passage s'effectuait sur un sable mouillé ferme proche du rivage, avec une teneur en eau d'environ 20%. Le second passage s'effectuait sur un sable mouillé profond sur une zone située à 20 m environ, parallèle à la précédente, d'une teneur en eau d'environ 13,5% (Crevier-Denoix et al., 2009).

Sur un sable mouillé profond, le cheval s'enfonce davantage. Cette modification s'accompagne d'une diminution de la longueur des foulées et de la phase de soutien, et d'une augmentation de la fréquence et de la durée de l'appui. Les résultats obtenus témoignent d'une diminution du choc de l'impact, des forces maximale de freinage et verticale maximale et des vitesses de mise en charge. Il s'agit donc d'une surface plus amortissante que le sol mouillé ferme. En revanche, les forces impliquées en fin d'appui, lors de la propulsion, sont augmentées par rapport au sable ferme, en raison de la participation plus importante des muscles propulseurs du membre dans un sol fuyant. L'articulation du boulet se fléchit moins en fin de propulsion, ce qui peut être considéré comme une situation à risque pour le tendon fléchisseur superficiel du doigt (Crevier-Denoix, 2011).

Crevier Denoix a également montré que la fréquence d'apparition de tendinite du fléchisseur superficiel du doigt est plus élevée sur un sol ferme que sur un bon sol hersé. Une hypothèse est que le risque de tendinite du tendon fléchisseur superficiel du doigt et du ligament suspenseur du boulet est lié au degré de descente du boulet, qui est augmentée sur sol ferme.

RETENIR

La teneur en eau du sol influence la composante amortissante du sol. Moins le sable est humide, plus l'enfoncement du pied dans le sol est important, et plus l'amortissement des forces à l'impact est important. Ceci influence les paramètres de la foulée, puisque la diminution de la teneur en eau du sable d'accompagne d'une augmentation de la fréquence des foulées et d'une diminution de leur longueur.

IV.B.2. LES INTERACTIONS ENTRE PIED DU CHEVAL ET SOL AU COURS DE LA LOCOMOTION

IV.B.2.1. NOTION DE SURFACE PORTANTE

Dans l'étude de Oosterlinck et al, les interactions entre le sol et le sabot de 5 poneys non ferrés ont été étudiées grâce à une plaque de pression dans deux conditions de sol différentes :

- Sol dur : la plaque est surmontée d'un tapis en caoutchouc de 5 mm.
- Sol souple : la plaque est surmontée d'une couche de 50 mm de sable fibré.

L'effet d'amortissement conféré par le sol souple explique la diminution de la pression verticale maximale ainsi que l'augmentation de la durée de la phase d'appui qui ont été mises en évidence dans cette étude (Oosterlinck et al., 2014). Sur sol souple, la surface de contact entre le sabot et le sol était augmentée par rapport au sol dur, traduisant une répartition plus uniforme de la charge sur le pied dans une carrière en sable fibré.

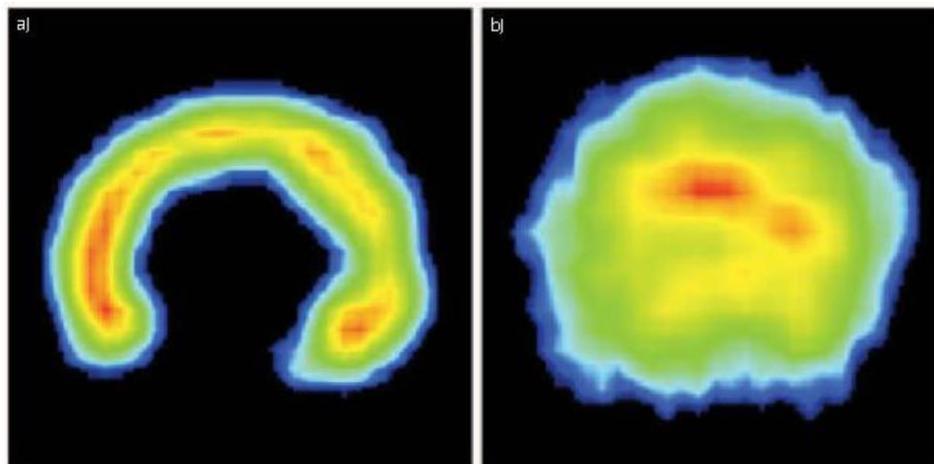


Figure 35 : Exemple représentatif de la pression totale enregistrée sur une plaque de pression pendant une foulée complète sur le membre antérieur gauche d'un poney au pas sur sol dur (a) et sur sol souple (b). La distribution de la pression exercée est indiquée par une couleur bleue en cas de pression faible et en rouge en cas de pression importante. Chaque pixel correspond à un capteur de pression. D'après ((Oosterlinck et al., 2014))

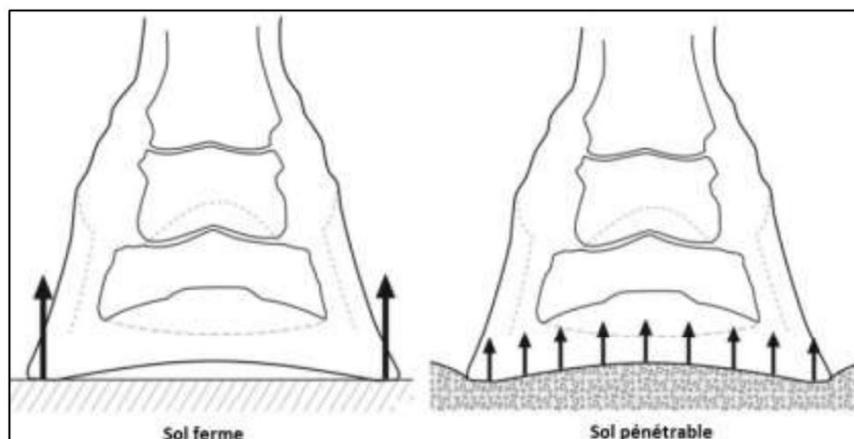


Figure 36 : Schéma explicatif de l'influence du sol sur la surface portante du pied, d'après (Parks, 2012)

La ferrure influence la surface portante en éloignant le pied du sol. Pour un cheval ferré, la surface portante est constituée par la surface du fer en contact avec le sol, aussi appelée **couverture**. Il est donc possible de faire varier cette surface portante en modifiant la ferrure. Par exemple, élargir le fer en pince limite son enfoncement, et une ferrure à oignons prend appui sur les barres, augmentant la surface portante à l'arrière du pied (Parks, 2012).

RETENIR

La **surface portante** du sabot est constituée par l'ensemble des parties du sabot au contact avec le sol. Cette surface dépend de la nature du sol (figures 35 et 36) :

- Sur un sol pénétrable, meuble, une surface importante du pied sera en contact avec le sol.
- Sur un sol ferme, seules la paroi et la périphérie de la sole seront en contact avec le sol.

IV.B.2.2. EFFET DU SOL A L'IMPACT

Selon la façon dont le pied se pose, le choc de l'impact a lieu au début de l'appui, plus tardivement sur le pied postérieur que sur l'antérieur. Ce choc correspond à la collision passive entre la partie distale du membre et la surface de la piste ; il est caractérisé par la **décélération verticale maximale** du pied, ou pic d'impact (exprimé en $m.s^{-2}$) (Gustas et al., 2006). L'impact engendre des vibrations dont l'énergie est proportionnelle au pic de décélération. De toutes les variables biomécaniques pouvant être mesurées, c'est la plus sensible aux propriétés de la **surface** du sol (Chateau et al., 2009).

Le projets Sequisol et Safetrack ont retenu une valeur-seuil de décélération verticale maximale à **-4000 $m.s^{-2}$** (Crevier-Denoix et al., 2016) au-delà de laquelle un risque pathogène est présent pour le cheval. Cette valeur caractérise la fermeté superficielle de la piste, et dépend grandement de l'entretien du sol. En effet, le hersage de la surface s'accompagne d'une nette diminution du choc d'impact.

L'intensité du choc d'impact dépend également de la profondeur de la couche de travail. Pour un sol en microsable fibré testé avec un cheval au galop, le choc augmente lorsque la couche de travail est réduite.

Les travaux de Gustas ont montré que les vibrations engendrées par l'impact n'influencent que très peu la portion du membre située proximale au boulet (Gustas et al., 2001). Les conséquences pathogènes sur les structures proximales du choc d'impact sont donc assez limitées.

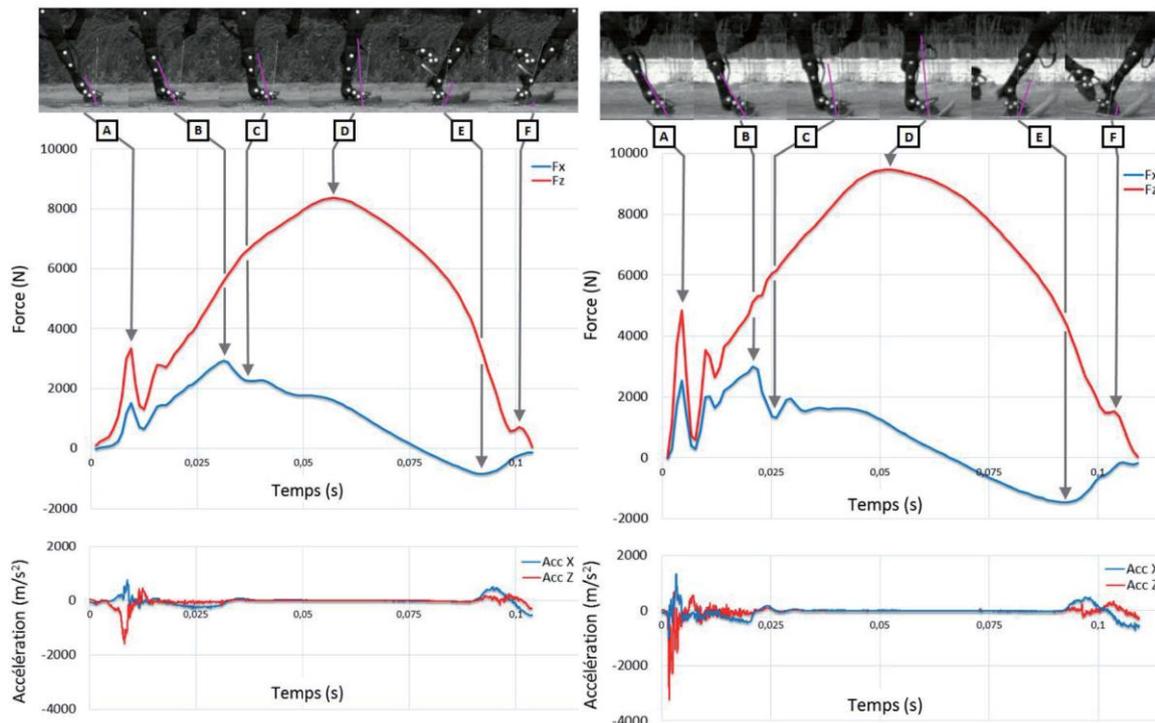


Figure 37 : (Gauche) Force et accélération mesurées sous le pied d'un trotteur à 40 km/h, sur une **piste souple**. Les composantes longitudinale (X) et verticale (Z) de la force et de l'accélération sont tracées séparément, en fonction du temps.

(Droite) Force et accélération mesurées sous le pied d'un trotteur à 40 km/h, sur une **piste dure**. Les différentes périodes de l'appui sont caractérisées par des événements clefs : A, pic d'impact ; B, fin du freinage (Fx max) ; C, extension inter-phalangienne proximale ; D, force verticale maximale (Fz max) ; E, force maximale de propulsion (Fx min) ; F, décollement des talons. D'après (Crevier-Denoix et al., 2016)

IV.B.2.3. EFFET DU SOL AU FREINAGE

L'impact est suivi d'une phase d'enfoncement dans le sol et de glissement du pied vers l'avant, qui correspond au freinage. Le corps du cheval s'avance avec la partie proximale du membre, ce qui a pour effet de réorienter les forces exercées sur le membre, augmentant la composante verticale (Fz) de ces forces. Durant cette phase de freinage, la composante horizontale de la force (Fx) augmente jusqu'à son maximum à l'arrêt du glissement du pied. Les caractéristiques du sol, et notamment celles de la couche de travail, influencent de façon importante la valeur de cette force maximale de freinage (Fx max) (Robin et al., 2009). Plus la surface est meuble et déformable, plus le déplacement du pied sera important, moins Fx max sera importante et plus la mise en charge du membre sera progressive. Cependant, un sol trop déformable n'est pas particulièrement recherché car il est défavorable à la performance dans la mesure où il rallonge la durée de l'appui (Crevier-Denoix et al., 2016).

IV.B.2.4. EFFET DU SOL SUR L'EXTENSION DES ARTICULATIONS INTERMEDIAIRES

L'arrêt du glissement du pied vers l'avant est immédiatement suivi par la descente du boulet, ce qui entraîne un recul du point d'application de la force de réaction du sol et une compression des talons. Le carpe atteint son pic d'extension maximale, et le boulet subit une extension rapide qui met le tendon fléchisseur superficiel du doigt en tension, ce qui participe à l'extension de l'articulation inter-phalangienne proximale (AIPP), jusqu'alors fléchie (Denoix, 1994). Sur les surfaces meubles, l'enfoncement des talons dans la couche de travail sous l'effet de la descente du boulet réduit la compression des talons et la vitesse avec laquelle le tendon FSD est mis en tension. L'extension interphalangienne proximale est donc moins brutale sur un sol déformable que sur une surface ferme.

IV.B.2.5. EFFET DU SOL SUR LA MISE EN CHARGE VERTICALE MAXIMALE

Suite à l'extension des articulations interphalangienne proximale, métacarpo-phalangienne et du carpe, la force de réaction a une composante verticale maximale, et elle est encore orientée légèrement vers l'arrière, en phase d'amortissement. Sur les postérieurs, elle est dirigée légèrement vers l'avant, en phase de propulsion. La vitesse de mise en charge verticale du membre traduit la capacité du sol à se déformer sous la poussée des membres, et varie beaucoup en fonction des propriétés du sol, déjà comprimé par les phases précédentes de l'appui. Elle est en particulier conditionnée par les propriétés du sol en profondeur (au-delà des 13 premiers centimètres) (Munoz-Nates et al., 2016). Plus la profondeur de la couche de travail augmente, plus la vitesse de mise en charge verticale du membre diminue. Les pistes en sable fibré, qui sont des sols peu compactables, se traduisent par un maximum de la composante verticale de la force de réaction réduit par rapport aux surfaces traditionnelles (Crevier-Denoix, Pourcelot, et al., 2013). La vitesse de mise en charge verticale est une variable clé de l'apparition de traumatismes sévères, comme les fractures des os longs (Crevier-Denoix et al., 2016). Ces valeurs dépendent grandement de la vitesse du cheval, car c'est le facteur de risque majeur d'accident.

IV.B.2.6. EFFET DU SOL SUR LA PROPULSION

Lorsqu'il arrive à l'étape de la propulsion, le cheval a déjà compacté le sol au cours des étapes précédentes de l'appui. Un bon sol entraîne malgré cela une phase de propulsion courte. Un sol profond a pour conséquence un effort de propulsion supplémentaire par rapport à un bon sol, avec une valeur minimale de la composante horizontale de la force (F_x min) atteinte plus tard, et une durée relative de l'appui augmentée. Ce sol profond entraîne également un retard à l'élévation du boulet et une bascule du pied en pince (Crevier-Denoix et al., 2010). Un sol profond est à éviter lors de tendinopathie du tendon FSD ou du ligament suspenseur du boulet (Crevier-Denoix, Ravary-Plumioen, et al., 2013).

IV.B.2.7. EFFET DU SOL SUR LE DECOLLEMENT DES TALONS

A la toute fin de l'appui, le décollement des talons est permis par le tendon fléchisseur profond du doigt en basculant la pince du pied. Cette traction se traduit par un pic de la composante verticale de la force (F_z) au moment du décollement des talons du sol. Les sols qui ne permettent pas de bascule du pied en pince, c'est-à-dire les sols durs, augmentent ce phénomène. De même, les sols profonds, qui nécessitent la réalisation d'un effort supplémentaire pour décoller les talons profondément ancrés dans le sol, entraînent une aggravation de ce phénomène. En revanche, les sols souples s'accompagnent d'un pic de F_z moins important, et sont donc indiqués pour des chevaux qui présentent des antécédents pathologiques de syndrome podotrochléaire ou au niveau de la bride carpienne (Crevier-Denoix, Ravary-Plumioen, et al., 2013).

RETENIR

L'ensemble des études portant sur l'influence des sols sur la locomotion du cheval tend à démontrer l'importance de la nature du sol sur les contraintes biomécaniques (forces, accélérations) appliquées sur les membres du cheval. Notamment, les angles articulaires, la vitesse et le pic d'extension des articulations des membres sont conditionné par les propriétés du sol. Cela se traduit en pratique sur les chevaux de course par l'augmentation du risque d'apparition de tendinites du fléchisseur superficiel du membre interne à la corde sur des sols durs, et plus d'inflammation osseuse des boulets (Crevier-Denoix, 2015b). Cependant, à l'heure actuelle, les données ne sont pas complètement établies et les conclusions sont amenées à évoluer avec les nouvelles études menées ces dernières années. Il y a donc encore des études à mener afin d'élucider la part de responsabilité du sol et l'ensemble des mécanismes qui permettent d'expliquer la pathogénie de certaines affections locomotrices des membres.

Actuellement, l'influence du sol sur la ligne du dessus demeure inconnue.

V. INFLUENCE DES FACTEURS EXTRINSEQUES SUR LA LOCOMOTION DORSALE DU CHEVAL

V. A. INFLUENCE DU POIDS DU CAVALIER

Parmi les facteurs susceptibles d'influencer la locomotion dorsale du cheval, le poids et la position du cavalier qui monte le cheval semble intuitivement avoir une importance. Une étude menée par De Cocq *et al* s'est penchée sur le sujet, en comparant les différences de cinématique du dos sur des chevaux au trot, suivant les trois conditions suivantes : non monté, monté par un cavalier au trot assis, et monté par un cavalier au trot enlevé. Cette étude a démontré que la présence d'un cavalier et sa position au trot affectent les mouvements du dos du cheval et ont une influence sur la mise en charge du dos par le mécanisme de « bow and string » proposé par Slijper (de Cocq *et al.*, 2009).

En particulier, la présence d'un cavalier, qu'il soit au trot assis ou au trot enlevé, augmente l'amplitude de mouvement de flexion-extension globale du dos. Au trot enlevé, la flexion maximale du dos est similaire à celle du cheval non monté, tandis que l'extension maximale se rapproche de celle observée lorsque le cavalier est au trot assis (de Cocq *et al.*, 2009).

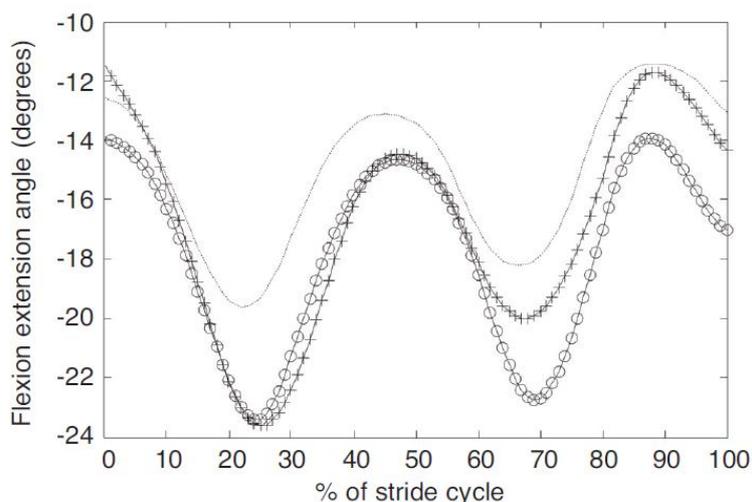


Figure 38 : Exemple de mouvement angulaire de flexion-extension au niveau de L3 au trot. Comparaison entre le trot sans cavalier (ligne pointillée), le trot enlevé (croix) et le trot assis (cercles). (de Cocq *et al.*, 2009)

L'amplitude de mouvement de latéroflexion de L3 et L5 est augmentée au trot enlevé par rapport aux autres situation étudiées. Par ailleurs, le poids du cavalier modifie la flexion cervicale, avec une tête portée plus basse au trot enlevé qu'au trot assis, et une flexion plus importante de la sixième vertèbre cervicale (de Cocq *et al.*, 2009).

V. B. INFLUENCE DES BOITERIES ET DORSALGIES

L'induction d'une subtile boiterie antérieure sur un cheval sain affecte l'amplitude de mouvement du dos du cheval (Gómez Álvarez et al., 2007). Au pas, l'effet est minime, mais au trot, l'amplitude de mouvement de flexion-extension est augmentée, en particulier au niveau de la 10^{ème} vertèbre thoracique, avec une augmentation de la flexion pendant la phase portante du diagonal sain. Le cheval modifie le schéma des mouvements thoraco-lombaires dans le plan sagittal et dans le plan horizontal, probablement dans le but d'éloigner le centre de gravité du côté boiteux et de réduire le poids exercé sur le membre boiteux (Gómez Álvarez et al., 2007). Une discrète boiterie antérieure provoque par ailleurs une position moyenne de la tête plus basse comparée à celle d'un cheval non boiteux.

L'induction d'une boiterie postérieure discrète a aussi des effets significatifs sur la cinématique dorsale du cheval (Gómez Álvarez, Bobbert, Lamers, Johnston, Back, & van Weeren, 2008), provoquant des modifications discrètes mais détectables de la cinématique thoraco-lombaire. L'amplitude de mouvement de flexion-extension globale de la colonne vertébrale est augmentée au pas, en particulier pour la région thoracique. Au trot, l'amplitude de mouvement de la portion lombo-sacrée du rachis est diminuée. Une rotation compensatoire du bassin est observée, afin de soulager le membre boiteux.

Le lien étroit entre le fonctionnement des membres et celui du dos peut ainsi expliquer l'apparition de dysfonctionnements dans la biodynamique du dos lors de boiteries chroniques, même de bas grade.

V. C. INFLUENCE DE LA FERRURE

L'étude de la cinématique du dos du cheval au pas indique que déferrer un cheval des quatre pieds induit des différences significatives sur les mouvements de sa ligne du dos au pas et au trot (Dendauw, 2019). Cela signifie que ferrer un cheval modifie significativement les mouvements du dos.

Un cheval ferré augmente la flexion de son encolure (Dendauw, 2019) parallèlement à une augmentation de la flexion de l'épaule et du carpe au soutien au pas et au trot (Mortagne, 2016), ce qui constitue une perte d'efficacité locomotrice. Ceci participe à expliquer les meilleurs résultats observés sur les chevaux de course déferrés des quatre pieds en comparaison aux chevaux de course ferrés des quatre pieds.

La forme des fers provoque également des variations des mouvements de la ligne du dessus, en particulier le balancier cervico-thoracique, avec des modifications importantes des angles de flexion-extension au niveau de C6 et T6 (Dendauw, 2019).

Une ferrure à l'envers posée sur les membres postérieurs, modifie le port de tête du cheval, qui est plus placé qu'avec la ferrure de référence. Associée à une extension plus intense du coude et de l'épaule, ainsi qu'à une protraction augmentée des membres antérieurs (Blanville, 2016), cette ferrure aux postérieurs permet ainsi d'avoir une meilleure attitude du cheval pour les épreuves de dressage.

Les fers en œuf et les fers à pince couverte induisent une extension de l'encolure en comparaison avec une ferrure classique (Dendauw, 2019). Ainsi, il est tout à fait possible d'imaginer que ces ferrures induisent un déplacement du centre de masse caudalement, et donc un report de poids sur l'arrière-main et les membres postérieurs.

PARTIE II : ETUDE EXPERIMENTALE

I. OBJECTIFS DE L'ETUDE

De nombreuses études sur la ligne du dessus s'appuient sur des protocoles expérimentaux sur un tapis roulant, qui constitue une surface ferme. Or, le cheval de sport travaille le plus souvent sur un sol souple. Il a été montré que la nature et la profondeur du sol modifient les paramètres de la foulée et la biomécanique des membres (Crevier-Denoix et al., 2009), mais peu d'études se sont appliquées à constater l'impact de la composante « sol » sur la ligne du dessus du cheval. La présente étude cherche ainsi à comparer les mouvements de la ligne du dessus du cheval sur un sol meuble et sur un sol dur, au pas puis au trot.

Notre travail fait suite à l'étude de l'influence du sol et de la ferrure sur la cinématique des membres antérieurs et postérieurs menée antérieurement. En effet, 6 thèses centrées sur les mêmes expérimentations ont été effectuées depuis 2016 (Blanville, 2016; Carro, 2016; Dendauw, 2019; Malinvaud, 2018; Mortagne, 2016; Villedéy, 2018). Elles ont permis de montrer, entre autres, qu'une modification de la ferrure postérieure sur sol souple avait plus de répercussions sur les articulations proximales du membre postérieur que sur les articulations distales, et que certaines ferrures postérieures entraînaient une modification de la locomotion des antérieurs sans changer significativement celle des membres postérieurs. Des différences de flexion et d'extension de la ligne du dessus ont été mises en évidence au pas et au trot en fonction de différentes ferrures. En particulier, la pose de fers sur les pieds antérieurs induit des effets majeurs sur les membres et la ligne du dessus, tandis que la pose de fers sur les pieds postérieurs ne provoque pas de modifications significatives de la cinématique des membres et de la ligne du dessus.

La modification de la surface portante plantaire par la ferrure influence particulièrement le balancier cervico-thoracique, et a donc certainement une importance significative dans l'équilibre du cheval, en jouant sur son centre de masse. Plus précisément, toutes les ferrures kinésithérapiques étudiées, à l'exception du fer à l'envers, induisent une extension de l'encolure en comparaison avec la ferrure de référence constituée de fers standards aux quatre membres. Concernant le type de sol, ces études ont montré que ce facteur avait une influence principalement sur les membres distaux mais aussi sur les articulations proximales du membre postérieur.

Ce dernier constat nous a amené à nous intéresser, dans cette étude, à l'influence du sol sur la cinématique de la ligne du dessus, au pas et au trot. En particulier, nous nous appliquerons à comparer les angles dorsaux de flexion – extension de différents chevaux en fonction du sol.

Etant donné l'anatomie, la cinématique et la biomécanique des membres et de la ligne du dessus décrites dans la première partie de ce travail, l'hypothèse posée est que le sol, qui influence la biomécanique des membres, a également une action sur la cinématique de la ligne du dessus.

Par ailleurs, il a été démontré que la conformation individuelle de chaque cheval influence de façon prépondérante la cinématique de la ligne du dessus. Il est donc nécessaire de prendre chaque cheval comme son propre témoin dans l'expérience qui suit (Malinvaud, 2018; Villedéy, 2018).

II. MATERIEL ET METHODE

II. A. EXPERIMENTATION

II. A. 1. LES CHEVAUX

Six chevaux ont été sélectionnés pour la réalisation de l'étude. Ils vivent en paddock, n'ont pas fourni de travail pendant un an minimum, sont déferrés et parés toutes les huit semaines.

- Cheval n°1 : Jument Lipizzan de 17 ans, toisant 155 cm au garrot, 522 kg.
- Cheval n°2 : Jument Trotteur Français de 19 ans, 153 cm au garrot, 586 kg.
- Cheval n°3 : Jument Trotteur Français de 8 ans, 164 cm au garrot, 636 kg.
- Cheval n°4 : Jument Trotteur Français croisé Anglo-Arabe de 13 ans, 172 cm au garrot, 720 kg.
- Cheval n°5 : Jument Poney Français de Selle de 17 ans, 151 cm au garrot, 430 kg.
- Cheval n°6 : Jument Trotteur Suédois de 14 ans, 158 cm au garrot, 542 kg.

Les critères d'inclusion à l'étude étaient au nombre de deux : le cheval devait être non boiteux au moment de l'étude et son historique médical ne rapporte pas de boiterie au cours des six derniers mois. Cette absence de boiterie a été objectivée par un vétérinaire équin spécialisé en locomotion du cheval lors d'un examen clinique et locomoteur incluant une observation au pas et au trot en ligne droite sur sol dur, ainsi que des flexions, et des cercles sur sol dur et sur sol mou au pas et au trot.

Dans cette étude, seules seront étudiées les conditions de ferrure légères dites standards, c'est-à-dire les fers en acier sans pinçon, avec une section de 16 x 5 mm aux postérieurs, et des fers en aluminium au antérieurs. Les poids des fers standards en aluminium et en acier sont proches : de 180 à 200 g pour les fers en acier, et de 240 à 260 g pour les fers en aluminium. Ces fers ont été choisis car les ferrures légères sont utilisées couramment pour les chevaux de course, et plus en plus souvent utilisés pour les chevaux de sport.



Figure 39 : Ferrures standard utilisées lors des passages étudiés. A : Fer standard en aluminium aux antérieurs.
B : Fer standard en acier aux postérieurs. (Photographies de P. Doffemont).

II.A.2. POSITIONNEMENT DES MARQUEURS

Les juments ont été équipées de marqueurs anatomiques réfléchissants. Des marqueurs hémisphériques de 2 cm de diamètre ont été placés sur leur ligne du dessus, sur les centres de rotation des articulations des membres droits et sur les segments osseux adjacents à ces articulations. Le positionnement des marqueurs est repéré par palpation puis marqué par une zone de rasage pour éviter les variations de position des marqueurs entre deux conditions de passage pour un même cheval.

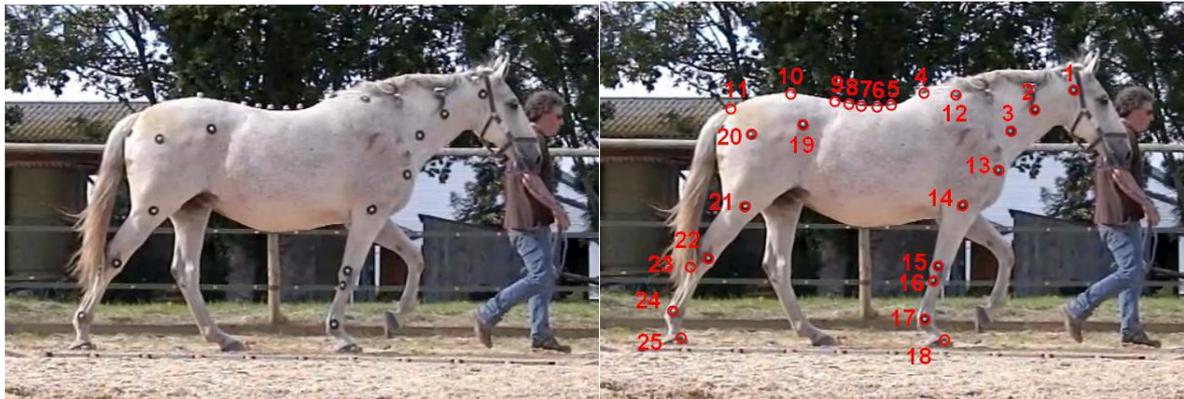


Figure 40 : Position des marqueurs réfléchissant sur les chevaux de l'étude avant et après traitement informatique via tpsDig2w32. (Photo P.Doffemont)

Nous nous intéressons ici aux marqueurs de la ligne dessus, au nombre de onze, placés au niveau du centre des vertèbres C1, C3 et C6, sur l'extrémité dorsale des processus épineux des vertèbres T6, T10, T13, T17, L1, L3, sur le *tuber sacrale* droit, et à la base de la queue, à la jonction sacro-caudale (ce dernier repère est rajouté manuellement lors du traitement informatique).

Trois marqueurs cutanés sont nécessaires afin de repérer une articulation et de mesurer son angle d'ouverture (flexion – extension). Un marqueur est placé au niveau du centre de rotation de l'articulation étudiée tandis que deux autres sont placés sur les segments osseux adjacents. Ainsi, un même marqueur peut être utilisé pour repérer deux articulations différentes.



Figure 41 : Exemple d'angle repéré grâce aux marqueurs anatomiques : angle formé entre le segment passant par C3-C6 et celui passant par C6-T6

Tableau I : Liste des marqueurs placés dans l'étude

Ligne du dessus	1	Centre de C1
	2	Centre de C3
	3	Centre de C6
	4	Extrémité dorsale du processus épineux de T6
	5	Extrémité dorsale du processus épineux de T10
	6	Extrémité dorsale du processus épineux de T13
	7	Extrémité dorsale du processus épineux de T17
	8	Extrémité dorsale du processus épineux de L1
	9	Extrémité dorsale du processus épineux de L3
	10	Tuber sacrale
	11	Base de la queue
Membre antérieur	12	Extrémité proximale de la scapula
	13	Tubercule majeur de l'humérus
	14	Ligament collatéral latéral du coude
	15	Processus styloïde latéral du radius
	16	Tête du métacarpien rudimentaire
	17	Articulation métacarpo-phalangienne
	18	Face dorsale de la couronne du sabot
	Non utilisé	Centre de rotation du pied
Membre postérieur	19	Tuber coxae au point le plus bas
	20	Troisième trochanter du fémur
	21	Insertion distale du ligament collatéral latéral fémoro-tibial
	22	Malléole latérale du tibia
	23	Tête du métatarsien rudimentaire
	24	Articulation métatarso-phalangienne
	25	Face dorsale de la couronne du sabot
	Non utilisé	Tuber ischiae
	Non utilisé	Centre de rotation du pied

II.A.3. LE TERRAIN

Deux types de sol sont comparés dans notre étude : un sable de carrière et l'asphalte. La piste de sable se trouve dans une carrière formée de 30 cm de calcaire, 10 cm de sable drainant 0/4 et 12 cm de sable de Martot en surface. Afin de permettre à la piste en sable de conserver ses propriétés mécaniques, humidité et pénétrance notamment, la carrière utilisée est régulièrement entretenue durant toute la durée d'acquisition des données, s'étalant sur deux jours consécutifs. Un arrosage et un hersage sont réalisés la veille des expérimentations. Un coup de râteau est passé après chaque cheval.

Les deux pistes étudiées sont délimitées par des repères visibles, afin d'encadrer au mieux les chevaux lors de leurs passages, et d'aider le meneur à les diriger. Pour chaque sol, le même couloir de 3 m de large sur 12 m de long est matérialisé à l'aide de barres au sol et de chandeliers. La piste en sable est ainsi disposée le long d'une barrière, et la piste d'asphalte est disposée le long d'un bâtiment.

Des marqueurs de distance sont placés le long de la piste, en arrière-plan, tous les 30 cm, et sur trois hauteurs : au niveau du sol, à 40 cm de hauteur et à 80 cm de hauteur.



Figure 42 : Terrains étudiés. A: couloir en sable de carrière. B: couloir d'asphalte. (Photo P.Doffemont)

II.A.4. LES PASSAGES

Après avoir été habitués au passage dans le couloir, les chevaux sont menés en main à l'aide de deux longues et par la même personne tout au long des expérimentations. Les longues sont tenues le plus lâchement possible pour ne pas perturber les mouvements de la tête et du cou du cheval. Les chevaux sont installés au pas ou au trot en ligne droite sur quelques foulées avant d'entrer dans le couloir. Le passage dans le couloir doit alors montrer une allure régulière et respecter un trajet perpendiculaire à la caméra. La caméra doit pouvoir enregistrer une foulée entière. Six passages conformes à ces critères, au pas et au trot, sont ainsi réalisés pour chaque condition de sol et de ferrure.

II.A.5. DESCRIPTION DE LA TECHNIQUE D'ENREGISTREMENT ET ACQUISITION DES DONNEES

Les passages sont filmés avec une caméra Casio Exilim EX-F1 avec une fréquence de trois cents hertz. La caméra est placée à 13,60 m de la piste, perpendiculairement à celle-ci, et réglée de manière à filmer un champ de 3 m de large au niveau de la piste. Les jarrets des chevaux sur la piste servent à la mise au point de la caméra avant chaque passage.

II.A.5.1. CALCUL DE LA VITESSE LORS DES PASSAGES

Dans un souci de précision, seuls les passages où la vitesse était comparable ont été conservés pour les calculs d'angles à venir. La vitesse du cheval a été calculée pour chaque enregistrement, afin d'établir les passages où la vitesse était comparable. Les calculs des vitesses ont été effectués à l'aide du logiciel Windows Movie Maker, en réalisant une soustraction entre le moment de passage de l'articulation coxofémorale entre deux repères espacés de 2,4 m. Cette opération a été renouvelée pour chaque passage. Une moyenne de vitesse a été calculée pour chaque ferrure et pour chaque jument. Ce travail a permis à Blanville, Carro et Mortagne d'exclure les passages dont la vitesse différait de plus de 5 % par rapport à la moyenne des passages d'un même cheval avec une même ferrure. La vitesse entre les différentes conditions de ferrure n'a pas montré de différence significative : pour la ferrure de référence, elle est de 1,53 m/s au pas (écart-type de 0,05 m/s) et de 3,51 m/s au trot (écart-type de 0,17 m/s).



Figure 43 : Captures d'écran du calcul de vitesse. A : 1'16''00. B : 1'31''40. $V = 15,40/2,4 = 1,55$ m/s. (Blanville)

II.A.5.2. DETERMINATION DES PHASES DE LA FOULEE

Les vidéos sont lues à l'aide du logiciel tpsDig2w32 à raison de trois cents images par seconde (logiciel disponible sur <http://life.bio.sunysb.edu/morph/>). Les foulées sont définies et découpées en douze phases. Le début de la foulée, T0, correspond au début de la phase d'appui du premier membre postérieur touchant le sol, lorsque celui-ci arrête de glisser. La fin de la foulée correspond au moment auquel ce même membre touche à nouveau le sol après sa phase de soutien. La durée de la foulée, celle de la phase d'appui et celle de la phase de soutien ont été mesurées à l'aide du logiciel Image J dans une précédente étude (Carro, 2016). Le champ de la caméra permet de visualiser l'ensemble des marqueurs de peau sur une demi-foulée de membre postérieur droit ou gauche, au pas ou au trot. On a donc chaque fois une foulée de dos.

Chaque foulée de dos est divisée en six intervalles de temps égaux, délimités par sept images. Selon la latéralité du premier membre postérieur posé, les images sont nommées D0, D1, ... D6 pour une foulée droite, et G0, G1, ... G6 pour une foulée gauche. D6 correspond donc à G0 pour la ligne du dessus.

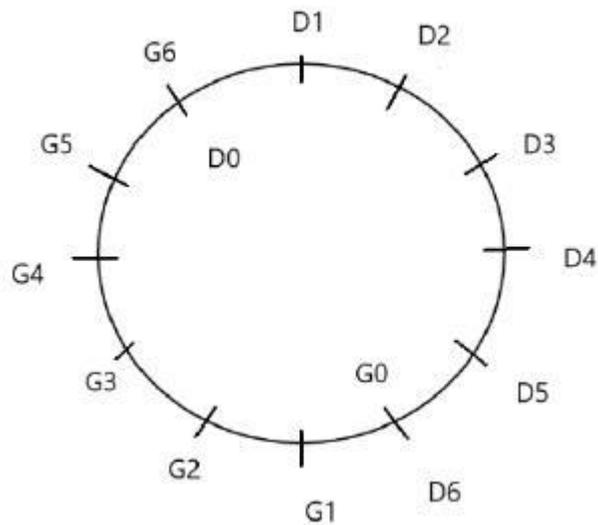


Figure 44: Cycle d'une foulée avec les noms des différentes phases étudiées (schéma de Cyprien Bole)

Lorsque les dernières images d'une demi-foulée ne permettent pas de voir tous les marqueurs, les dernières images de la demi-foulée précédente sont utilisées. Cela arrive lorsque le poser du membre postérieur a lieu tard dans la vidéo. Par exemple, si on ne peut pas utiliser les images correspondant aux phases G5 et G6, on va utiliser les images correspondant à D4 et D5 de la demi-foulée précédente.

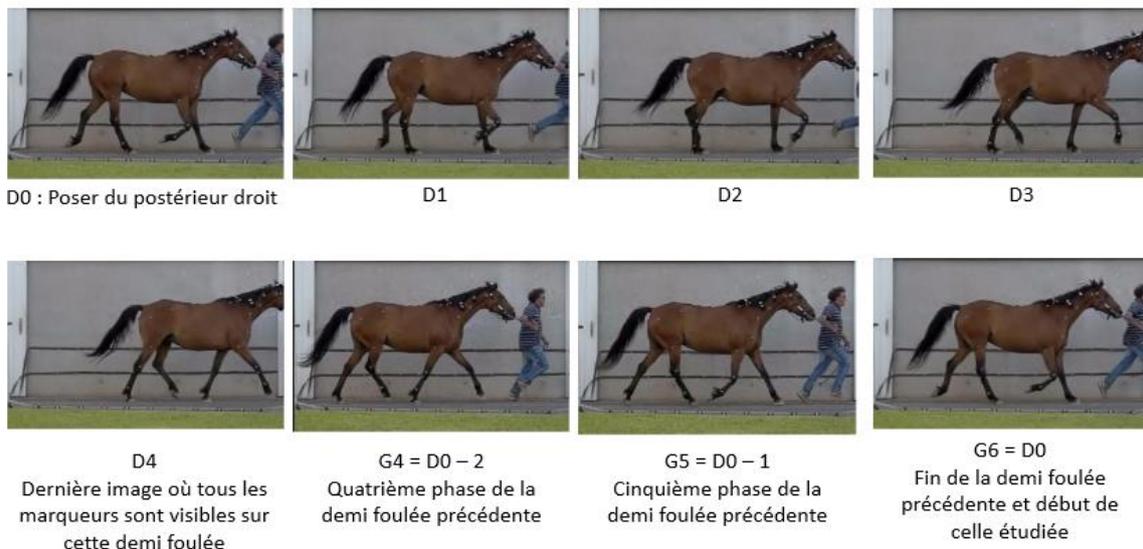


Figure 45 : Exemples d'images d'une demi-foulée de trot à analyser lorsque les images des dernières phases ne montrent pas tous les marqueurs.

II.A.5.3. POINTAGE DES MARQUEURS

Le pointage des vingt-cinq marqueurs réfléchissants est réalisé manuellement pour chaque image. Au terme d'un entraînement préliminaire, une étude statistique a été effectuée sur la répétition du repérage d'un même marqueur fixe sur soixante passages par les deux expérimentateurs (Tableau XII). La variabilité individuelle et inter-expérimentateur sont faibles comparativement à la précision permise par le logiciel de mesure. Cela a permis de valider le repérage manuel des marqueurs. Les coordonnées des marqueurs sont ainsi mesurées par rapport à l'échelle de la photographie et enregistrées sous format texte.

Tableau II : Analyse statistique pour la validité du repérage manuel des marqueurs sur la vidéographie (Villedey, 2018).

	Expérimentateur 1		Expérimentateur 2		Bilan
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart-type	Ecart-type
Sable	176,5	2,9	175,6	2,7	2,8
Asphalte	172,4	2,6	173,2	2,5	2,5

II.A.5.4. PRESENTATION DU JEU DE DONNEES

L'ensemble des données a été conservé au sein d'un tableau Microsoft Excel qui répertorie toutes les caractéristiques de l'expérience, comme par exemple le numéro du cheval, le type de sol, la ferrure, l'allure, le numéro du passage, etc.

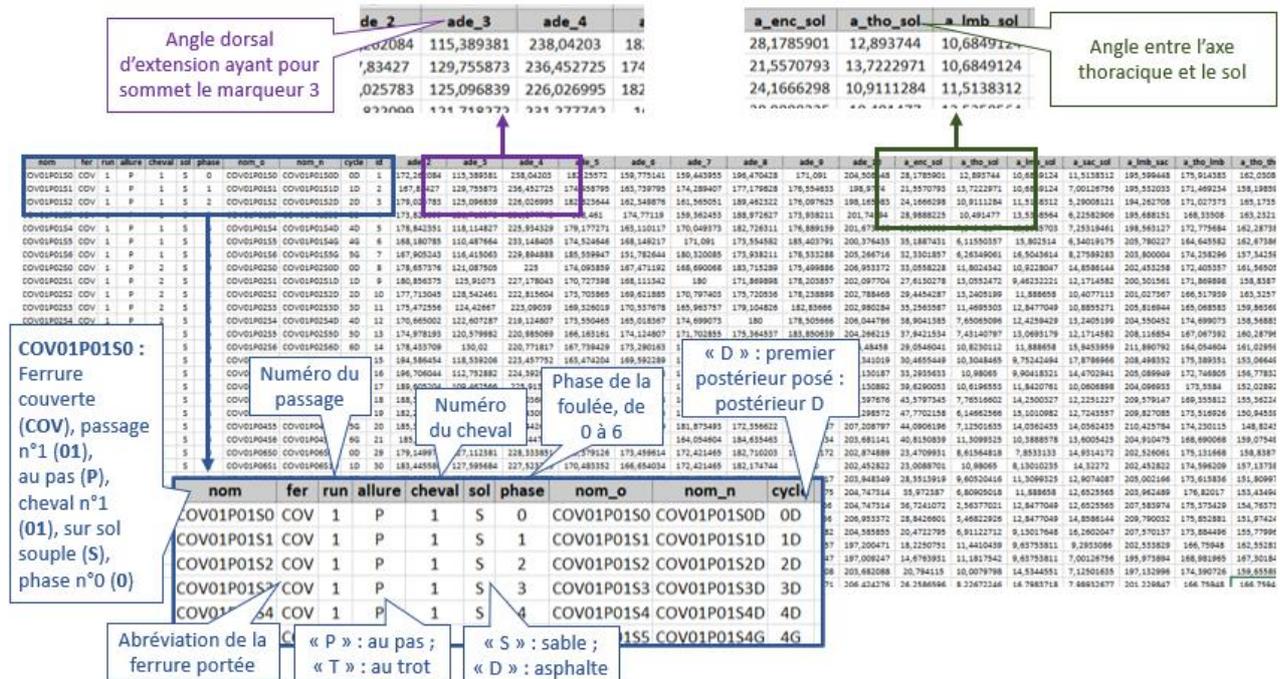


Figure 46 : Présentation du tableau de données

II.B. EXPLOITATION DES DONNEES

Dans le cadre des études de Malinvaud et Villedey, Cyprien Bole, statisticien, a repéré les fichiers défectueux du jeu de données. Il a réalisé une analyse en composante principale pour supprimer les points pour lesquels la valeur est supérieure à deux écarts-types par facteur (numéro de passage, sol, ferrure, allure et moment du cycle). Ces images aberrantes sont des images mal nommées, ou reflétant un non-respect du protocole de pointage, ou auxquelles il manque un point. Lorsqu'une erreur dans la symétrie du cycle était perçue, un algorithme de réaffectation des noms corrects a permis de récupérer les images erronées. Les coordonnées ainsi récoltées ont été utilisées dans les études de morphométrie géométrique de Malinvaud et Villedey en 2018 (Malinvaud, 2018; Villedey, 2018).

II.B.1. OBTENTION DES VALEURS D'ANGLES DORSAUX D'EXTENSION

Les angles dorsaux d'extension ont été calculés par Dendauw en 2019 à partir des coordonnées des marqueurs et de la loi d'Al-Kashi. Ainsi, ont été définis :

- Les valeurs des petits angles dorsaux formés par trois marqueurs adjacents.
- Les grands angles entre l'encolure (segment passant par les marqueurs 1 et 3), la portion vertébrale thoracique (segment passant par les marqueurs 4 et 7), lombaire (segment passant par les marqueurs 8 et 10) et ou sacrée (segment passant par les points 10 et 11) et le sol.
- Les grands angles d'extension thoraco-cervicale (angle entre le segment passant par les points 2 et 3 et le segment passant par les points 4 et 5), thoracique moyenne (angle entre le segment passant par les points 4 et 5 et le segment passant par les points 6 et 7), thoraco-lombaire (angle entre le segment passant par les points 6 et 7 et le segment passant par les points 8 et 9) et lombo-sacrée (angle entre le segment passant par les points 8 et 9 et le segment passant par les points 10 et 11).

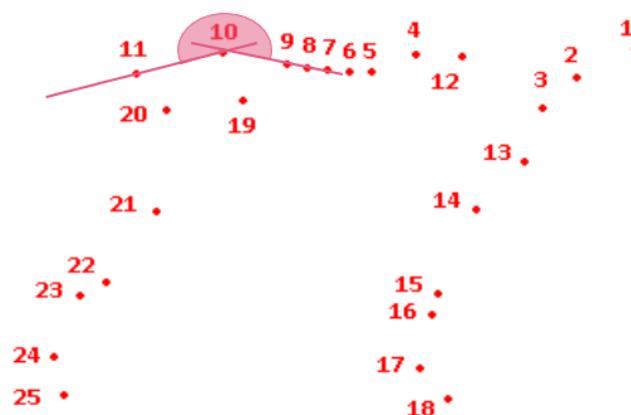


Figure 47 : Exemple de grand angle d'extension à partir des marqueurs extraits avec le logiciel tpsDig2w32 : angle lombo-sacrée.

II.B.2. ANALYSE STATISTIQUE

L'analyse statistique a également été réalisée avec R, en utilisant un modèle linéaire à effet mixte. Ici, on s'intéresse à l'influence du sol sur la cinématique de la ligne du dessus du cheval au pas et au trot avec la ferrure de référence. La distribution des résidus est comparée à la distribution normale pour chaque test.

II.C. RESULTATS

Les données obtenues à droite et à gauche pour chaque angle et pour chaque phase ont été comparées avec un modèle linéaire à effet mixte, prenant pour effet fixe le sol et pour effet aléatoire le cheval. Cette comparaison a montré qu'il existait une différence significative entre la moyenne des données à droite et celle des données à gauche pour certains angles et pour certaines phases. En l'absence de différences significatives, les données à droite et les données à gauche ont été réunies (D0 et G0, D1 et G1, ...). En présence d'une différence significative, les données à droite et les données à gauche ont ensuite été traitées séparément. La normalité des résidus a été contrôlée après chaque test.

II.C.1. RESULTATS AU PAS

II.C.1.1. Résultats pour les grands angles dorsaux

Tableau III : Résultats des grands angles au pas sur sable versus asphalte

		A _{enc/sol}	A _{tho/sol}	A _{lmb/sol}	A _{sac/sol}	A _{lmb/sac}	A _{tho/lmb}	A _{tho/tho}	A _{tho/cer}
Phase 0	G			+1.9±0.3° p<0.001					
	D				-1.5±0.5° p=0.004				
Phase 1	G			+1.9±0.4° p=0.001	-1.0±0.4° p=0.008	+2.6±0.8° p<0.001	-1.9±0.8° p=0.019	-2.6±0.7° p<0.001	
	D			+1.2±0.4° p<0.001					
Phase 2	G								
	D								
Phase 3	G		+1.3±0.3° p<0.001		-1.5±0.6° P=0.012				+5.6±1.5° p<0.001
	D				-1.1±0.5° p=0.026				
Phase 4	G			+0.5±0.2° p=0.046					+3.7±1.5° p=0.014
	D				-1.1±0.5° p=0.031				
Phase 5	G			+1.7±0.3° p<0.001					
	D				-1.0±0.5° p=0.042				
Phase 6	G			+1.9±0.4° P<0.001					
	D								

Abréviations employées dans le Tableau III :

Case grise = absence d'influence statistiquement observable du sol

$A_{enc/sol}$: angle entre l'encolure et le sol

$A_{tho/sol}$: angle entre la portion vertébrale thoracique et le sol

$A_{lmb/sol}$: angle entre la portion vertébrale lombaire et le sol

$A_{sac/sol}$: angle entre la portion vertébrale sacrée et le sol

$A_{lmb/sac}$: angle d'extension lombo-sacrée

$A_{tho/lmb}$: angle d'extension thoraco-lombaire

$A_{tho/tho}$: angle d'extension thoraco moyenne

$A_{tho/cer}$: angle d'extension thoraco-cervicale

II.C.1.2. Résultats pour les petits angles dorsaux d'extension

Tableau IV : Résultats des petits angles au pas selon le sol, sable versus asphalte

		A_{C3}	A_{C6}	A_{T6}	A_{T10}	A_{T13}	A_{T17}	A_{L1}	A_{L3}	A_{TS}
Phase 0	G	$-2.3 \pm 0.8^\circ$ $p=0.004$						$-3.5 \pm 1.5^\circ$ $p=0.021$		
	D		$-1.9 \pm 0.8^\circ$ $p=0.020$	$+2.5 \pm 0.9^\circ$ $p=0.005$						
Phase 1	G	$-1.3 \pm 0.6^\circ$ $p=0.047$	$-1.3 \pm 0.6^\circ$ $p=0.047$	$+2.5 \pm 0.6^\circ$ $p<0.001$			$+4.0 \pm 1.3^\circ$ $p=0.002$	$-5.9 \pm 1.4^\circ$ $p<0.001$	$+2.9 \pm 0.8^\circ$ $p<0.001$	
	D									
Phase 2	G			$+1.6 \pm 0.6^\circ$ $p=0.015$		$-1.9 \pm 0.9^\circ$ $p=0.026$	$+2.9 \pm 1.2^\circ$ $p=0.017$			
	D									
Phase 3	G	$-2.2 \pm 0.8^\circ$ $p=0.005$	$-2.2 \pm 0.8^\circ$ $p=0.005$	$+2.7 \pm 0.7^\circ$ $p<0.001$			$+2.2 \pm 1.1^\circ$ $p=0.044$	$-3.0 \pm 1.3^\circ$ $p=0.018$		
	D			$+3.0 \pm 1.2^\circ$ $p=0.012$						$-1.3 \pm 0.6^\circ$ $p=0.042$
Phase 4	G	$-1.8 \pm 0.8^\circ$ $p=0.030$	$-1.7 \pm 1.3^\circ$ $p=0.037$				$+2.5 \pm 1.0^\circ$ $p=0.019$			
	D			$+3.0 \pm 0.6^\circ$ $p<0.001$						
Phase 5	G			$+2.4 \pm 1.0^\circ$ $p=0.012$						
	D									$+1.6 \pm 0.6^\circ$ $p=0.007$
Phase 6	G	$-1.9 \pm 0.7^\circ$ $p=0.007$		$+1.8 \pm 0.8^\circ$ $p=0.030$						$+1.2 \pm 0.6^\circ$ $p=0.043$
	D		$-1.8 \pm 0.7^\circ$ $p=0.008$	$+2.6 \pm 1.0^\circ$ $p=0.010$						

Abréviations employées dans le Tableau IV :

Case grise = absence d'influence statistiquement observable du sol

A_{C3} : angle dorsal d'extension formé par C1-C3-C6

A_{C6} : angle dorsal d'extension formé par C3-C6-T6

A_{T6} : angle dorsal d'extension formé par C6-T6-T10

A_{T10} : angle dorsal d'extension formé par T6-T10-T13

A_{T13} : angle dorsal d'extension formé par T10-T13-T17

A_{T17} : angle dorsal d'extension formé par T13-T17-L1

A_{L1} : angle dorsal d'extension formé par T17-L1-L3

A_{L3} : angle dorsal d'extension formé par L1-L3-TS

A_{TS} : angle dorsal d'extension formé par L3-TS-JSC

II.C.1.3. Bilan des résultats de la cinématique de la ligne du dessus au pas

A l'allure du pas, sur le sable par rapport à l'asphalte, les juments étudiées ont présenté :

- Une augmentation des angles thoracique ($+1.3\pm 0.3^\circ$, $p<0.001$ en phase 3) et lombaire ($+0.5\pm 0.2^\circ$ à $+1.9\pm 0.4^\circ$, $p=0.046$, en phase 0, phases 1 à gauche et à droite, en phases 4, 5 et 6) et une diminution de l'angle sacré ($-1.0\pm 0.4^\circ$ à $-1.5\pm 0.6^\circ$, $p=0.031$, en phase 0 à droite, en phase 1, en phase 3 à droite et à gauche, et en phases 5 et 4 à droite).
- Une augmentation des flexions cervico-thoracique ($+3.7\pm 1.5^\circ$ à $+5.6\pm 1.8^\circ$, $p=0.014$ en phase 3 et 4) et lombo-sacrée ($+2.6\pm 0.8^\circ$, $p<0.001$ en phase 1) et une augmentation de l'extension thoracique moyenne ($-2.6\pm 0.7^\circ$, $p<0.001$ en phase 1) et thoraco-lombaire ($-1.9\pm 0.8^\circ$, $p=0.019$ en phase 1).
- Plus d'extension en C3 ($-1.3\pm 0.6^\circ$ à $-2.3\pm 0.8^\circ$, $p=0.047$, en phases 0, 1, 3, 4 et 6 de la foulée) et en C6 ($-1.3\pm 0.6^\circ$ à $-2.2\pm 0.8^\circ$, $p=0.047$, en phases 0 à droite, phases 1, 3, 4 à gauche et 6 à droite).
- Plus de flexion en T6 ($+1.6\pm 0.6^\circ$ à $+3.0\pm 1.2^\circ$, $p=0.015$, en phase 0 à droite, en phases 1, 2, 3, 6 et en phases 4 à droite et 5 à gauche) et en T17 ($+2.2\pm 1.1^\circ$ à $+4.0\pm 1.3^\circ$, $p=0.044$, en phases 1, 2, 3 et 4).
- Au début de la demi-foulée, plus d'extension en T13 ($-1.9\pm 0.9^\circ$, $p=0.026$, en phase 2) et en L1 ($-3.0\pm 1.3^\circ$ à $-5.9\pm 1.4^\circ$, $p=0.018$, en phases 0, 1 et 3) et plus de flexion en L3 ($+2.9\pm 0.8^\circ$, $p<0.001$, en phase 1).
- Plus d'extension sacrée (-1.3 ± 0.6 , $p=0.042$, en phase 3 à droite) en milieu de demi-foulée, et plus de flexion ($+1.6\pm 0.6^\circ$, $p=0.007$, en phase 5 à droite) en fin de demi-foulée.

RETENIR

Au pas, nos résultats témoignent d'une augmentation des flexions cervico-thoraciques et lombo-sacrées sur sol souple que sur sol dur, avec une extension plus marquée en C3 et en C6, et une flexion plus marquée en T6 et T17. Une augmentation de l'extension thoracique et thoraco-lombaire était également observable. En début de demi-foulée, une augmentation de l'extension sacrée est observée simultanément à l'extension en T13 et en L1. En fin de demi-foulée, la flexion de L3 accompagne une flexion plus marquée du sacrum.

II.C.2. RESULTATS AU TROT

II.C.2.1. Résultats pour les grands angles dorsaux

Tableau V : Résultats des grands angles au trot

		A _{enc/sol}	A _{tho/sol}	A _{lmb/sol}	A _{sac/sol}	A _{lmb/sac}	A _{tho/lmb}	A _{tho/tho}	A _{tho/cer}
Phase 0	G			+0.6±0.3° p=0.026					
	D								
Phase 1	G								+3.9±1.3° p=0.003
	D			+1.4±0.5° p=0.004					
Phase 2	G	-3.4±1.6° p=0.039		+0.8±0.3° p=0.006					+8.4±2.5° p<0.001
	D								
Phase 3	G	-4.7±1.6° p=0.039		+1.7±0.4° p<0.001			-2.5±1.0° p=0.016		+7.1±1.6° p<0.001
	D			+1.3±0.5° p=0.013		+3.3±1.4° p=0.018			
Phase 4	G	-4.9±1.7° p=0.004		+1.6±0.4° p<0.001				-2.8±0.9° p=0.002	+6.9±1.7° p<0.001
	D			+1.1±0.5° p=0.017					+5.8±2.2° p=0.008
Phase 5	G	-3.4±1.7° p=0.041		+1.2±0.3° p<0.001					+5.1±1.5° p<0.001
	D				+1.0±0.3° p=0.004				
Phase 6	G			+1.0±0.4° P<0.010		+1.8±0.9° P=0.031			+3.5±1.5° p=0.016

II.C.2.2. Résultats pour les petits angles dorsaux

Tableau VI : Résultats des petits angles au trot selon le sol, sable versus asphalte

		A _{C3}	A _{C6}	A _{T6}	A _{T10}	A _{T13}	A _{T17}	A _{L1}	A _{L3}	A _{T5}
Phase 0	G									
	D	-3.2±1.0° p=0.002								
Phase 1	G	-2.3±0.9° p=0.009		+2.6±0.7° p<0.001				-3.0±1.2° p=0.013		
	D									
Phase 2	G	-2.9±1.1° P=0.007	+3.4±1.5° p=0.020							
	D	-2.4±1.0° p=0.017								
Phase 3	G		+4.2±1.7° p=0.012	+3.2±1.2° p=0.006				-4.3±1.5° p=0.003		
	D			+2.8±1.2° p=0.018						
Phase 4	G	-2.6±1.1° p=0.015	+3.3±1.2° p=0.007	+3.9±0.9° p<0.001		-3.1±1.1° p=0.006				
	D			+4.0±0.8° p<0.001						
Phase 5	G			+2.7±0.1° p=0.042			+2.5±1.3° p=0.049	-3.8±1.4° p=0.005		
	D	-3.9±1.3° p=0.003								-3.0±1.2° p=0.013
Phase 6	G			+3.7±1.1° p<0.001						
	D									

II.C.2.2. Bilan des résultats de la cinématique de la ligne du dessus au trot

Sur le sable par rapport à l'asphalte, nous avons observé :

- Une diminution de l'angle cervical ($-3.4 \pm 1.6^\circ$ à $-4.9 \pm 1.7^\circ$, $p=0.041$ en phases 2, 3, 4 et 5) et une augmentation des angles lombaire ($+0.6 \pm 0.3^\circ$ à $+1.7 \pm 0.4^\circ$, $p=0.026$ en phases 0, 3, 5 et 6, et en phase 2 à gauche) et sacré ($+1.0 \pm 0.3^\circ$, $p=0.004$ en phase 6).
- Une augmentation des flexions cervico-thoracique ($+3.5 \pm 1.5^\circ$ à $+8.4 \pm 2.5^\circ$, $p=0.0016$ en phase 1, 3, 4, 5 et 6, et en phase 2 à gauche) et lombo-sacrée ($+1.8 \pm 0.9^\circ$ à $+3.3 \pm 1.4^\circ$, $p=0.031$ en phase 3 à droite et en phase 6), et une augmentation de l'extension thoracique moyenne ($-2.8 \pm 0.9^\circ$, $p=0.002$ en phase 4) et thoraco-lombaire ($-2.5 \pm 1.0^\circ$, $p=0.016$ en phase 3).
- Plus d'extension en C3 ($-2.3 \pm 0.9^\circ$ à $-3.9 \pm 1.3^\circ$, $p=0.009$, en phase 0 à droite, 4 à gauche et 5 à droite, ainsi qu'en phases 1 et 2) et en L1 ($-3.0 \pm 1.2^\circ$ à $-4.3 \pm 1.5^\circ$, $p=0.01$, en phases 1, 3 et 5), et plus de flexion en C6 ($+3.3 \pm 1.2^\circ$ à $+4.2 \pm 1.7^\circ$, $p=0.012$, en phases 2 et 4 et en phase 3 à gauche) et en T6 ($+2.7 \pm 0.1^\circ$ à $+4.0 \pm 0.8^\circ$, $p=0.042$, en phases 1, 3, 4 et en phases 5 à gauche et 6 à gauche) en de nombreux points de chaque demi foulée.
- En milieu de demi-foulée, plus d'extension en T13 ($-3.1 \pm 1.1^\circ$, $p=0.006$, en phase 4) et au niveau des *tuber sacrale* ($-1.3 \pm 0.6^\circ$, $p=0.042$, en phase 3 à droite), et à la fin de la demi foulée, plus de flexion en T17 ($+2.5 \pm 1.3^\circ$, $p=0.049$, en phase 5) et au niveau des *tuber sacrale* ($+1.6 \pm 0.6^\circ$, $p=0.007$, en phase 5 à droite).

RETENIR

Au trot, nos résultats mettent en évidence un abaissement de l'encolure sur le sol souple par rapport au sol dur, à mettre en relation avec une augmentation de la flexion cervico-thoracique, marquée notamment par une flexion augmentée en C6 en de nombreux points de chaque demi-foulée. Une flexion plus marquée en région lombo-sacrée participe par ailleurs à l'augmentation des angles lombaires et sacrés par rapport au sol. En milieu de demi-foulée, plus d'extension est constatée en T13 et au niveau des *tuber sacrale*, tandis qu'à la fin de la demi-foulée, il y a plus de flexion en T17 et au niveau des *tuber sacrale*.

III.B.6. SCHEMATISATION DES RESULTATS

Dans cette partie, le cheval a été représenté schématiquement par des points, comme le montre la Figure 48. Pour rappel, les éléments anatomiques associés aux points de la ligne du dos ont été notés.

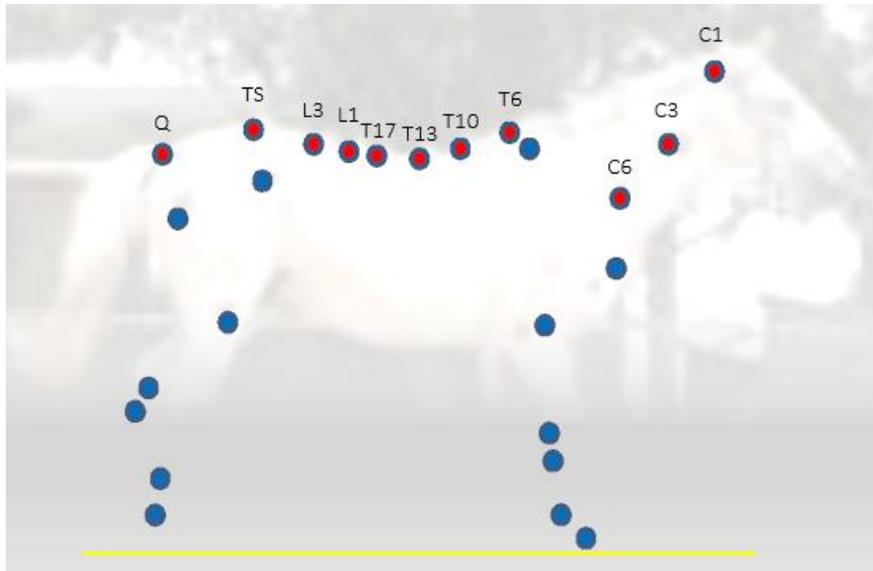


Figure 48 : Schématisation du cheval à l'aide des marqueurs utilisés dans l'expérience (crédit S.Caure)

Sur les schémas qui suivent, les modifications observées lors du passage sur le sol dur, par comparaison au sol souple seront notées de la façon suivante :

- Une flèche jaune indique une flexion plus importante au niveau du point considéré.
- Une flèche rouge indique une extension plus marquée.

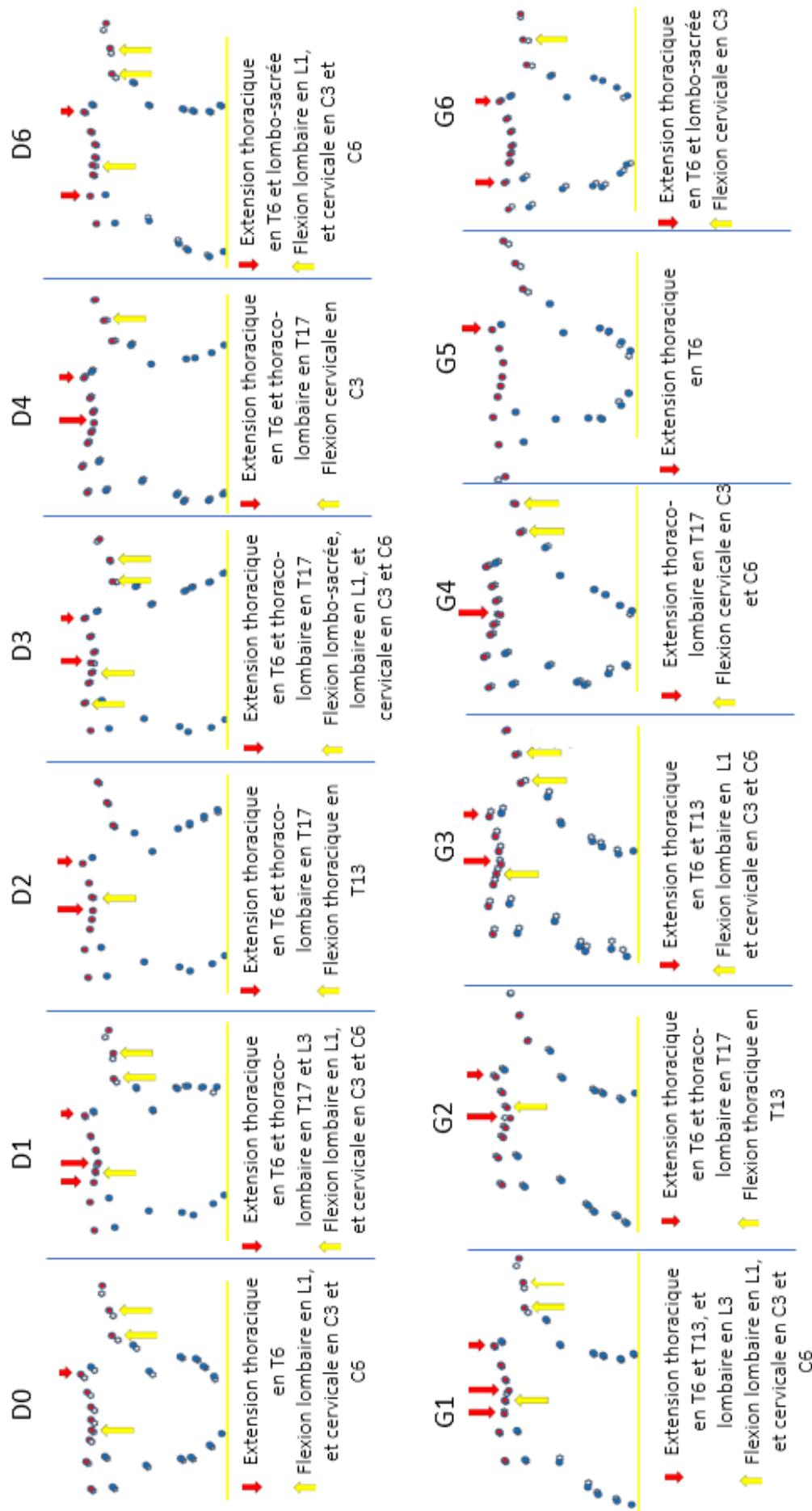


Figure 49 : Modifications des angles dorsaux au pas sur sol dur par rapport au sol souple (Crédit S. Caure)

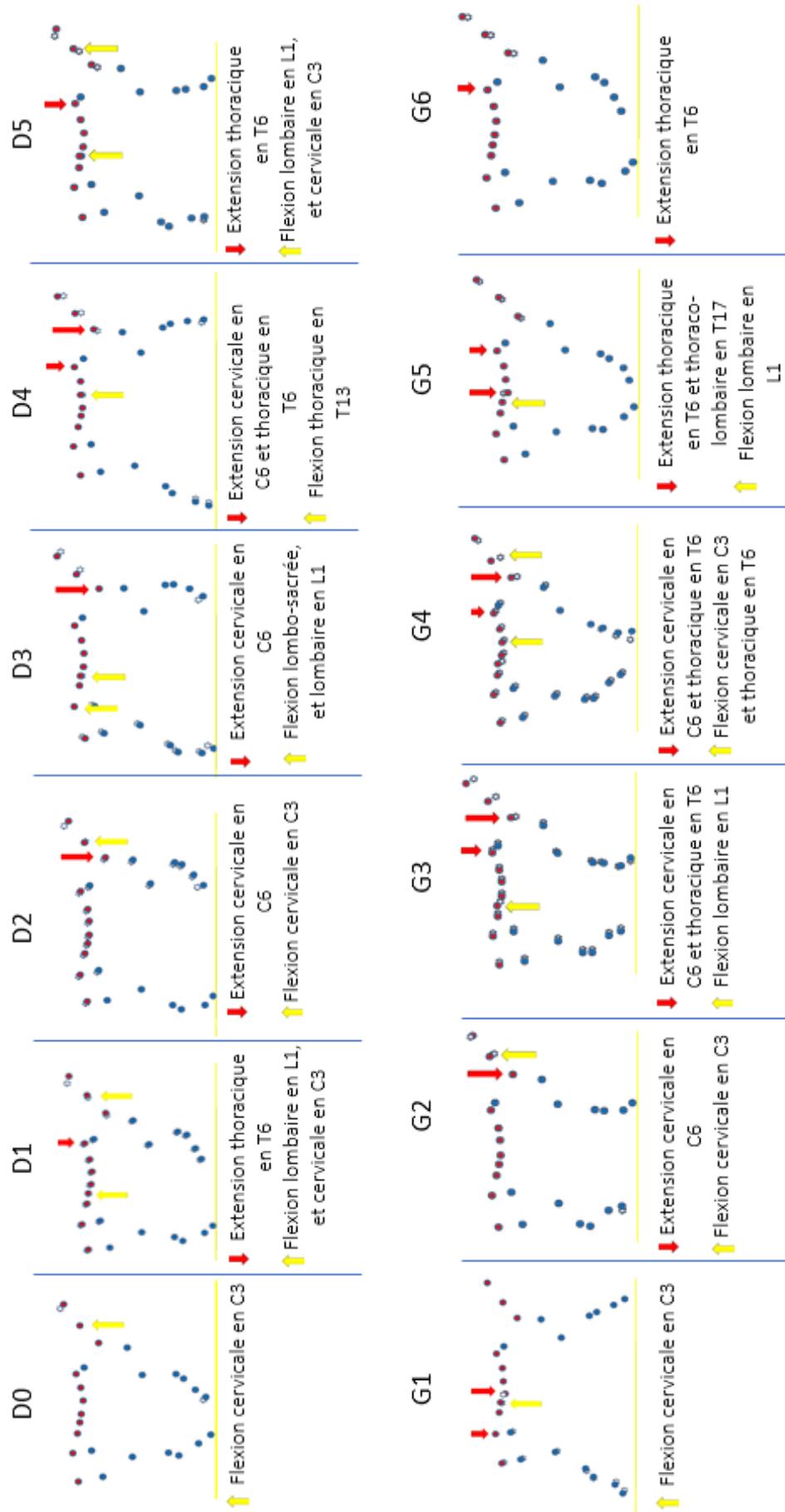


Figure 50 : Modifications des angles dorsaux au trot sur sol dur par rapport au sol souple (Crédit S. Caure)

III. DISCUSSION

III.A. VALIDITE DU PROTOCOLE EXPERIMENTAL

III.A.1. SELECTION DES PASSAGES ETUDIES

Cette étude a pour atouts d'être prospective, de répéter chaque mesure sur plusieurs passages et de les comparer à un témoin. De plus, la vitesse est contrôlée pendant l'expérimentation et au moment de traiter les données, malgré le fait qu'une étude de terrain ne permette pas de travailler à vitesse constante comme sur tapis roulant. En effet, les passages ont été sélectionnés avec soin afin de n'inclure que des passages ayant une vitesse similaire. Ce critère de vitesse est important car il influence les caractéristiques de la foulée, la cinétique du pied et la cinématique de la colonne vertébrale (Corbin, 2002; Pfau et al., 2005; Warner et al., 2010; Yoshihara et al., 2010; Zsoldos & Licka, 2015). Les résultats seraient très probablement différents avec des vitesses plus élevées.

Cependant, une source d'incertitude dans le choix des passages persiste : certaines séquences vidéo sélectionnées contiennent des passages où la tension exercée par le meneur sur la longe n'était pas nulle. Cela modifie sensiblement le port de tête du cheval et il est facilement concevable que ce facteur puisse modifier la locomotion dorsale. L'inclusion d'un critère de sélection des passages visant à supprimer ceux dont la longe est tendue pourrait être intéressante pour de futures études.

III.A.2. CHOIX DE LA POPULATION DE CHEVAUX ETUDIEE

III.A.2.1. EFFECTIF DE LA POPULATION D'ETUDE

Cette étude comportait 6 chevaux, cela correspond au nombre moyen des chevaux utilisés dans les premières études effectuées, présentant la méthode cinématique applicable au dos et leurs résultats (Faber, Johnston, et al., 2001; Faber, Schamhardt, Van Weeren, & Barneveld, 2001; Gómez Álvarez et al., 2009; Gómez Álvarez, Bobbert, Lamers, Johnston, Back, & Van Weeren, 2008). En raison du faible nombre de chevaux dans l'échantillon, nos tests statistiques ont probablement une faible puissance. Cela est en partie compensé par le fait que chaque cheval est également son propre témoin, c'est-à-dire que l'on compare l'effet du sol pour un même cheval et entre différents chevaux. L'augmentation du nombre d'individus recrutés pourrait permettre d'affiner les résultats en observant peut-être plus d'effets ou des effets différents lors des situations étudiées.

III.A.2.2. REPRESENTATIVITE DES CHEVAUX ETUDIES

Les chevaux de l'étude forment un groupe hétérogène sur les critères de race, taille, poids ou âge. Il n'est pas possible de créer des échantillons représentatifs de l'espèce équine à partir de ce groupe d'étude. Il aurait été plus rigoureux de prendre des chevaux aux caractéristiques semblables. Les chevaux sont cependant homogènes par rapport à leur

activité dans la mesure où ils sont tous au repos depuis un an. On peut donc imaginer que les résultats de l'étude sont potentiellement différents de ce qui aurait pu être obtenu avec des chevaux au travail, dont la musculature est plus développée.

Par ailleurs, l'examen locomoteur réalisé sur les chevaux étudiés par un vétérinaire spécialisé en locomotion du cheval a permis d'inclure dans l'étude exclusivement des chevaux réguliers dans leurs allures au pas et au trot. Nos résultats ne sont donc pas extrapolables aux chevaux boiteux.

III.A.2.3. REPRESENTATIVITE DE LA FERRURE ETUDIEE

Les chevaux de l'étude étaient chaussés à l'aide de fers dits « standards ». Ils ont également été chaussés à l'aide de ferrures kinésithérapiques, dont l'influence sur la locomotion fait l'objet d'autres études. Les fers aient été choisis dans une gamme de masses restreinte afin de limiter l'influence du poids de chaque ferrure sur la cinématique des membres qui les portent. Les passages où les chevaux portaient une ferrure différente de la ferrure standard n'ont pas été pris en compte dans notre étude. Pour des raisons matérielles, les fers standards employés étaient constitués d'aluminium aux antérieurs et d'acier aux postérieurs. La couverture des fers postérieurs était réduite par rapport à celle des antérieurs afin de maintenir un équilibre des poids entre membres antérieurs et postérieurs.

Les chevaux de sport portent habituellement des fers en acier aux membres antérieurs. En concours complet, les chevaux sont le plus souvent équipés de fers en aluminium aux membres antérieurs. Les chevaux de course sont ferrés avec des ferrures légères, et sont donc eux aussi concernés par cette étude. Les fers kinésithérapiques sont également majoritairement en aluminium.

III.A.3. REPRESENTATIVITE DES TERRAINS ETUDIES

Comparer deux types de terrains extérieurs ne présente pas les avantages des études en laboratoire, qui permettent de maîtriser un environnement standardisé.

La carrière utilisée pour les passages sur le sol souple était constituée d'une couche de travail souple constituée de 12 cm en sable de Martot (granulométrie de 160 µm), d'une couche de fondation en sable drainant 0/4, et d'un fond de forme de 30 cm de calcaire, ce qui correspond à une structure classique d'une surface d'évolution sur structure fermée.

Les études de Crevier-Denoix et al. (2010, 2015) ont souligné l'importance de la préparation de la piste sur les contraintes biomécaniques exercées sur les membres. Le hersage de la piste doit être régulier pour que la piste conserve ses caractéristiques en matière d'amortissement. Dans notre étude, un hersage a été réalisé la veille des expérimentations, et un coup de râteau est passé après chaque cheval.

Les mêmes études ont mis en évidence une augmentation de la propriété amortissante du sable lorsque sa teneur en eau diminue. Cela modifie de plus la cinématique des membres thoraciques au trot. Un arrosage a été réalisé la veille des expérimentations. Il aurait été intéressant de mesurer la teneur en eau du sable et d'assurer sa constance au long de l'expérimentation (Crevier-Denoix et al., 2010).

Etant donné que la durée de la phase de freinage du sabot est plus longue sur une piste synthétique que sur une piste en sable (Chateau et al, 2009), il est aisément imaginable que les résultats auraient différencié sur d'autres surfaces.

Par ailleurs, il est rapporté dans la littérature que la force de réaction du sol est plus importante pour des sol en sables fermes que pour les sols en sables profonds (Crevier-Denoix et al., 2010). Sur des sables fermes, la mise en charge du membre antérieur est plus progressive, l'extension maximale du boulet diminuée, et une phase de propulsion plus longue. Les différences observées sur les articulations proximales des membres seraient donc potentiellement plus importantes (Carro, 2016), ce qui pourrait se reporter sur la ligne du dessus.

III.A.4. ACQUISITION DES IMAGES

III.A.4.1. METHODE DE CAPTURE OPTIQUE

Les méthodes de capture optique du mouvement sont couramment utilisées dans les analyses cinématiques. La digitalisation manuelle des marqueurs réalisée dans notre étude est une méthode classiquement utilisée dans les analyses vidéographiques, et a été jugé comme étant une méthode convenable pour étudier la cinématique (H. M. Clayton & Schamhardt, 2001).

III.A.4.2. ANALYSE BIDIMENSIONNELLE

Les contraintes pratiques liées à une analyse de terrain ont amené le choix de réaliser une analyse bidimensionnelle avec une unique caméra pour la capture des images. Ceci constitue une source d'inexactitude dans la mesure où les mouvements du cheval s'effectuent dans les trois dimensions de l'espace. La latéroflexion et la rotation axiale des vertèbres ne sont pas analysées mais, lors d'une analyse bidimensionnelle, elles se confondent en partie avec les mouvements de flexion-extension mesurés, à cause de leur composante de déplacement vertical.

A cette limite de l'analyse bidimensionnelle s'ajoute l'imprécision liée au tracé emprunté par le cheval : si le cheval se déplace légèrement en biais par rapport à la caméra, des erreurs de parallaxe et de distorsion peuvent apparaître et modifier les mesures.

D'après la littérature, l'analyse bidimensionnelle est cependant suffisante pour de nombreuses études, dans la mesure où les limites évoquées n'entraînent pas problème de précision significatif pour l'analyse des mouvements de flexion-extension de la colonne vertébrale dans le plan sagittal (Corbin, 2002).

III.A.4.3. CHOIX DE LA NATURE ET DU POSITIONNEMENT DES MARQUEURS

Dans cette étude, les mouvements du dos des chevaux ont été suivis à l'aide de marqueurs cutanés. Les marqueurs employés dans cette étude étaient des repères circulaires de 2 cm de diamètre, ce qui correspond aux recommandations énoncées par Clayton, qui considère que des marqueurs de 1 à 3 cm de diamètre constituent des repères de taille idéale.

Ces marqueurs sont séparés des corps vertébraux par les processus épineux et par la peau. Les marqueurs cutanés ne reflètent pas strictement les mouvements des vertèbres, car la peau glisse sur les structures sous-jacentes. Dans le cadre d'une analyse dimensionnelle du

mouvement comme réalisée ici, le glissement de la peau sur les os serait la source d'une erreur de 10 à 15 % pour les mouvements de flexion et d'extension. Une étude de Faber, Schamhardt, et al (Faber, Schamhardt, Van Weeren, & Barneveld, 2001), a cependant démontré que l'usage de marqueurs cutanés pour l'étude des mouvements de flexion – extension de la portion thoraco-lombaire de la ligne du dessus est satisfaisante lors d'une étude cinématique en deux dimensions au pas et au trot. En effet, la corrélation entre les mesures obtenues avec cette méthode et l'usage de marqueurs osseux lors d'une étude en trois dimensions est correcte. Le caractère pratique et non invasif de ces marqueurs sont des avantages par rapport à l'utilisation de marqueurs osseux.

Les 25 marqueurs ont été positionnés sur les repères osseux les plus utilisés dans les études précédentes afin d'obtenir des résultats comparables à la littérature actuelle. (Audigié et al., 1999; Faber, Schamhardt, Van Weeren, Johnston, et al., 2001; Gómez Álvarez et al., 2009; Warner et al., 2010; Wennerstrand et al., 2006). Les marqueurs ont été placés sur le côté droit du cheval mis au carré, au niveau des repères classiquement utilisés lors d'études cinématiques de la ligne du dessus, notamment la nuque, le garrot et la croupe (H. M. Clayton & Schamhardt, 2001).

III.A.4.4. POINTAGE DES MARQUEURS

La mesure des coordonnées par pointage manuel des marqueurs fait l'objet d'erreurs :

- Des erreurs systématiques, dues à la distorsion de l'image par la lentille de la caméra.
- Des erreurs aléatoires, dues à la saisie manuelle des coordonnées.

La distorsion de l'image est une source d'erreur négligeable car les calculs d'angles sont toujours effectués à l'aide de 3 marqueurs du même champ visuel. Les erreurs aléatoires auraient éventuellement pu être corrigées en appliquant les première et deuxième harmoniques de Fourier au diagramme des angles dorsaux en fonction du temps (Audigié et al., 2002).

Une autre limite de la méthode d'acquisition des données tient au fait que les marqueurs n'ont été pointés qu'une fois en raison de contraintes de temps et de l'effectif disponible pour réaliser ce travail. La précision des coordonnées obtenue est donc diminuée. De plus, le pointage a été effectué par deux personnes différentes, et il n'a pas été réalisé en aveugle. Les attentes et anticipation des expérimentateurs ont donc pu influencer le pointage des marqueurs. Un système optoélectronique avec repérage automatique des marqueurs aurait permis de gagner en précision et de s'affranchir de la variabilité de pointage lié aux expérimentateurs. La répétabilité des mesures a été vérifiée avec le logiciel ImageJ dans une étude antérieure en pointant cinquante fois les quatre marqueurs du membre antérieur, ce qui a permis de mettre en évidence une répétabilité satisfaisante (Mortagne, 2016).

Le pointage des marqueurs a été réalisé sur sept images par foulée de dos. Les mesures ne sont donc pas prises en continu, ce qui signifie que certaines valeurs, et éventuellement les extremums de flexion et d'extension, ont pu ne pas être enregistrés. Les valeurs des variations observées sont donc à utiliser avec précaution.

III.A.4.5. DETERMINATION DES DIFFERENTES PHASES DE LA FOULEE

Classiquement, la détermination du T0, c'est-à-dire à l'instant où le pied arrête de glisser à l'impact (D0 ou G0 dans notre étude) est effectuée à l'aide d'un accéléromètre indiquant l'immobilisation du pied au sol (Mickelborough et al., 2000; Miller & Verstraete, 1996). Dans notre étude, ce moment a été déterminé visuellement lors du pointage manuel. L'usage d'une caméra avec une acquisition de trois cents images par seconde a facilité la détermination des limites de la phase d'appui, qui ont été fixées par la même personne pour tous les passages. Cependant, la délimitation des phases étudiées diffère certainement très légèrement d'un passage à l'autre.

La majorité des études qui utilisent un traitement automatique informatisé du repérage des points divise la foulée en 100 et effectue une courbe représentant leurs résultats de 0 à 100% (Audigié et al., 2002; Faber et al., 2010; Faber, Schamhardt, Van Weeren, Johnston, et al., 2001; Gómez Álvarez et al., 2007, 2009; Johnston et al., 2002; Wennerstrand et al., 2004). Dans notre cas, le repérage manuel des marqueurs cutanés ne nous a pas permis de procéder de cette façon. Le choix a été fait de diviser la foulée en 12 parties égales. Bien que cette méthode ne nous permette pas d'effectuer le même type de représentation visuelle des résultats que dans la littérature, nous avons émis l'hypothèse que cette méthode permettait d'indiquer les orientations majeures des mouvements sur une foulée à 4 temps. Nos résultats étant par ailleurs similaires à chaque étape de la foulée, ce qui nous laisse supposer qu'un découpage plus important n'aurait pas apporté d'information supplémentaire.

Des études (McGreevy & Rogers, 2005; Murphy & Arkins, 2006) ont pu objectiver la latéralité de certains chevaux, et explorer l'influence de certains facteurs sur la symétrie ou la latéralité. Elles ont notamment mis en évidence que la latéralité est fortement liée au sexe chez le cheval, avec une majorité de chevaux mâles qui présentent des réponses latéralisées gauches, contre une majorité de réponses latéralisées droites chez les juments. Ainsi, les différences observées dans notre étude entre les mesures sur les foulées à droite et sur les foulées à gauche pourraient d'expliquer par des préférences conformationnelles et comportementales liées à la latéralité des chevaux de l'études.

III.A.5. ANALYSE STATISTIQUE DES DONNEES

L'analyse statistique des données permet de distinguer les variations significatives des angles dorsaux parmi les mesures d'angle réalisées. Etant donnée l'influence démontrée de la morphologie du cheval sur la cinématique de la ligne du dessus (Malinvaud, 2018; Villedey, 2018), il était nécessaire d'annuler l'effet de la conformation individuelle de chaque cheval sur les valeurs obtenues. L'utilisation d'un modèle linéaire à effet mixte répond à cette exigence. L'expérimentation a été menée sur deux sols différents, au pas et au trot, à des vitesses similaires dans chaque allure, sur des chevaux sains portant des marqueurs du côté droit de leur corps. Les résultats obtenus ne peuvent pas être extrapolés à d'autres conditions d'expérimentation sans études supplémentaires.

III.B. INTERPRETATION DES RESULTATS

III.B.1. COMPARAISON DES MOYENNES DES ANGLES SUR SABLE AUX DONNEES DE LA BIBLIOGRAPHIE

Les moyennes des angles point par point sur le sable ainsi que l'étendue de chaque variable ont été calculées pour chaque phase à droite et à gauche, au pas puis au trot dans une étude précédente (Dendauw, 2019). L'étendue, qui correspond à la différence entre le maximum et le minimum, représente l'amplitude de mouvement de flexion – extension pour chaque angle. Les valeurs de cette dernière diffèrent à droite et à gauche. L'observation des amplitudes de flexion – extension des angles de la ligne du dessus a mis en évidence des écarts par rapport aux amplitudes données par la littérature (Audigié et al., 1999; Henson, 2009). Il est à noter en particulier que :

- Les amplitudes de flexion-extension de l'angle formé par les marqueurs en regard de C6, T10 et T13 et de la région lombo-sacrée sont un peu trop importantes au pas.
- Les amplitudes de flexion-extension caudalement à la vertèbre T6 sont légèrement plus faibles au pas.
- Les amplitudes au trot ne sont pas toujours nettement inférieures à celles au pas, comme le laissait présager la bibliographie.

Le fait que les mesures aient été réalisées à la main, dans des conditions moins rigoureuses et sur moins de points que ce qui a pu être fait par ailleurs pourrait en partie expliquer les différences observées. Cependant, l'hypothèse a été faite dans une étude précédente (Dendauw, 2019) que ces amplitudes sont suffisamment proches de celles de la littérature pour être considérées comme cohérentes. Nous estimerons donc que les résultats obtenus sont utilisables pour notre étude.

III.B.2. COMPARAISON DES DONNEES A DROITE ET A GAUCHE

Alors que les mouvements du cheval ont été supposés symétriques sur notre population d'étude non boiteuse, la comparaison statistique entre les données des foulées à droite et des foulées à gauche a montré des différences significatives pour certaines phases et certains angles, comme c'était le cas dans l'étude de Dendauw (Dendauw, 2019).

Une hypothèse possible à cette observation est l'asymétrie propre du cheval : comme chez l'homme, une latéralité est souvent observée chez le cheval, avec une orientation préférentielle des mouvements dans une direction donnée. Cette asymétrie physiologique peut être liée au sexe (Murphy & Arkins, 2006), à l'évolution de la conformation des chevaux pendant leur croissance ou à l'utilisation du cheval.

La sortie du cheval du plan orthogonal à celui de la caméra pourrait également l'expliquer : s'il se décale globalement de sa trajectoire ou bien s'il tourne sa tête, la projection du mouvement en deux dimensions est susceptible de fausser les angles de flexion-extension.

Quand les données à droite et les données à gauche étaient statistiquement différentes, elles ont été traitées séparément, ce qui a diminué la taille de l'échantillon dans les tests statistiques, altérant leur puissance statistique.

III.B.3. PHASE DE FREINAGE ET LIGNE DU DESSUS

Dans notre expérience, la protraction maximale du membre antérieur et du membre postérieur est plus élevée sur l'asphalte, comme l'a montré l'étude de Carro. Ceci est probablement dû à l'augmentation de la phase de glissement dans ces conditions. De plus, l'extension des articulations hautes est plus réduite sur l'asphalte, en début de phase d'appui, pour les articulations du coude au pas et de la hanche au trot.

L'absorption du pic de décélération par les articulations hautes se traduit sur l'asphalte au pas par une augmentation de l'extension lombo-sacrée à l'atterrissage, suivi d'une diminution en milieu d'appui, puis d'une augmentation au décollage. La résultante globale est une augmentation de la mobilité de la ligne du dessus au cours du cycle.

III.B.4. PARAMETRES DE LA FOULEE

Les études de Chateau et Oosterlinck (Chateau et al., 2010; Oosterlinck et al., 2014) ont montré que la phase d'appui du membre antérieur est plus courte sur sol souple que sur des sols fermes. La longueur de la foulée est par ailleurs diminuée, avec une fréquence de foulée augmentée.

Dans le protocole expérimental de notre étude, la foulée est plus courte sur l'asphalte que sur le sable au trot, sans autre différence significative (Carro, 2016). Les différences des sols, des ferrures et des vitesses étudiées entre ces études et la nôtre pourraient expliquer ces résultats différents.

III.B.5. ONDULATIONS DE LA LIGNE DU DOS

Dans notre étude, le sol souple augmente la flexion cervico-thoracique. Au pas, l'augmentation de la flexion thoracique crâniale observée en T6 est contrebalancée par une augmentation de l'extension cervicale moyenne en C3 et basse en C6. Au trot, l'encolure est portée plus basse suite à une augmentation de la flexion thoracique crâniale en T6 et cervicale basse en C6, ainsi qu'une augmentation de l'extension cervicale moyenne en C3.

Les trois fascias cervicaux et le ligament nuchal jouent un rôle majeur dans le stockage de l'énergie et leur action entraîne une extension de l'encolure. Sur un sol dur comme l'asphalte, le stockage de l'énergie élastique et sa conversion en énergie cinétique réduit la quantité d'énergie nécessaire pour le déplacement de l'encolure et des membres, ce qui pourrait expliquer l'augmentation de l'extension des membres (Carro, 2016; Chateau et al., 2010; Symons et al., 2014) et de l'encolure observée dans notre étude.

Nos résultats montrent un angle thorax-sol augmenté lorsque le cheval se déplace sur sol souple au pas, et un angle lombaire-sol augmenté au pas et au trot sur sable. L'augmentation de l'extension thoraco-lombaire était observable au pas et au trot, tandis que l'extension thoracique moyenne était augmentée exclusivement à l'allure du pas.

Nous avons pu constater qu'une augmentation de l'angle lombaire-sol s'accompagne d'une augmentation de l'angle lombo-sacré, même lorsque l'angle entre le sacrum et le sol est diminué au cours de la foulée, ce qui laisse supposer que l'orientation de la région lombaire est plus déterminante pour la flexion-extension lombo-sacrée que l'orientation du sacrum.

L'augmentation de la flexion lombo-sacrée est probablement plus liée à la flexion de L3 et de l'orientation du segment lombaire qu'à l'orientation du segment sacré, car nous avons observé des flexions plus ou moins marquée en région sacrée au court de la foulée.

Concernant les régions thoracique et thoraco-lombaire, un sol souple entraîne une augmentation de l'extension thoracique moyenne au pas grâce à une augmentation de l'extension en T13. L'augmentation de l'extension thoraco-lombaire est liée à l'augmentation de l'extension en T13 et en L1. La région thoracique caudale est en conséquence plus fléchie, et reçoit donc probablement plus de tensions, ce qui pourrait être un facteur de risque dans le développement d'arthropathies, largement localisée en T16-T17 (Girodroux et al., 2009). Les contraintes exercées sur les différentes portions du dos sont influencées par la nature du sol : un sol souple est plus contraignant pour les flexions lombo-sacrées et moins pour la jonction thoraco-lombaire, et inversement pour les sols durs. Le sol employé pour les protocoles de réhabilitation de chevaux convalescents doit donc être soigneusement choisi.

Dans notre étude, l'extension cervicale moyenne, la flexion cervico-thoracique, l'extension thoraco-lombaire et la flexion lombo-sacrée sont augmentée au pas et au trot sur sol souple par rapport à un sol dur. Au pas, l'extension thoracique moyenne est augmentée et la position de l'encolure est modifiée au trot en étant portée plus bas sur sol souple. Sur un tapis roulant, avec une surface relativement dure, une position basse de l'encolure augmente la flexion de la région thoracique moyenne et l'extension thoraco-lombaire et lombo-sacrée. Une tête portée plus haute provoque les modifications inverses (Álvarez et al., 2006). Dans notre étude, nous avons observé qu'une tête portée en position basse était associée à une augmentation de l'extension thoraco-lombaire et de la flexion lombo-sacrée. Ainsi, la nature du sol modifie les règles de fonctionnement qui régissent la biomécanique du dos.

Dans le modèle du « bow and string » de Slijper, une augmentation de la protraction postérieure est associée à une augmentation de la flexion des régions thoraco-lombaire et lombo-sacrée (Van weeren et al., 2010). Pourtant, dans notre étude, la diminution de la protraction des membres (Carro, 2016) sur le sable comparé à l'asphalte est concomitante avec une augmentation de l'extension thoracique moyenne et thoraco-lombaire, et une augmentation de la flexion lombo-sacrée. Ce modèle de « bow and string » semble donc s'appliquer à l'extension thoracique moyenne et thoraco-lombaire, mais pas à la flexion lombo-sacrée.

Sur le sable comparé à l'asphalte, nous avons observé plus d'extension en région cervicale haute (C3 en particulier, car C1 n'a pas été étudiée) au pas et au trot. Une hypothèse qui permettrait de l'expliquer est que l'augmentation de l'énergie nécessaire aux mouvements sur le sable induit une augmentation de l'extension cervicale moyenne. Ce phénomène revêt une importance toute particulière dans la discipline du dressage, où l'attitude du cheval va être modifiée par le sol sur lequel il évolue. Il semble donc important d'intégrer ce paramètre dans la préparation des échéances de concours, en tentant de s'entraîner sur des surfaces similaires à celle du sol de la compétition.

CONCLUSION

Ce travail avait pour ambition de déterminer l'influence du sol sur la cinématique de la ligne du dessus chez le cheval ferré, au pas et au trot. Dans cette optique, les données de cinématique de la ligne du dessus ont été extraites d'un protocole expérimental ayant suscité des études antérieures. A partir de ces données, plusieurs angles dorsaux ont été calculés afin d'obtenir des informations sur les mouvements de flexion et d'extension de régions localisées de la ligne du dessus du cheval. L'influence du sol sur ces flexions et extensions a été étudiée statistiquement à l'aide d'un modèle linéaire mixte. Ce modèle nous a permis d'utiliser chaque cheval comme son propre témoin, afin de s'affranchir de la conformation individuelle du dos, car, à la lumière des études précédemment menées, il s'agit du facteur faisant le plus varier la conformation géométrique du dos en mouvement.

Des variations de flexion et d'extension de la ligne du dessus ont été mises en évidence au pas et au trot lors du passage d'un support souple à un support dur, ce qui a confirmé notre hypothèse selon laquelle le sol influence la cinématique de la ligne du dessus chez le cheval.

Sur le sable par rapport à l'asphalte, l'extension de la région cervicale moyenne était augmentée au pas et au trot, ce qui signifie que l'attitude du cheval est modifiée par la surface sur laquelle il évolue. De plus, la flexion cervico-thoracique, l'extension thoraco-lombaire et la flexion lombo-sacrée étaient augmentées, traduisant un impact biomécanique du sol sur la ligne du dessus tout au long de la foulée. Il en résulte que les contraintes exercées sur les différentes portions du dos sont influencées par la nature du sol : un sol souple est plus contraignant pour les flexions lombo-sacrées et moins pour la jonction thoraco-lombaire, et inversement pour les sols durs.

Les résultats de la présente étude ont été obtenus dans des conditions particulières, avec un cheval doté d'une ferrure classique, mené en main au pas et au trot en ligne droite. Ils ne sont donc pas extrapolables en l'état à d'autres conditions d'observation. D'autres études pourraient permettre de vérifier que ces résultats peuvent s'appliquer à des chevaux montés, ainsi qu'à des vitesses différentes.

Notre étude s'inscrivant dans un projet de recherche globale sur la locomotion du cheval au pas et au trot, d'autres études utilisant les données récoltées sur ce protocole expérimental sont actuellement en cours, afin de compléter les résultats obtenus et d'étudier les amplitudes de hauteur de la tête et du pelvis et l'influence de l'angle plantaire sur les angles de la ligne du dessus.

Bibliographie

- Álvarez, C. B. G., Rhodin, M., Bobbert, M. F., Meyer, H., Weishaupt, M. A., Johnston, C., & Van Weeren, P. R. (2006). The effect of head and neck position on the thoracolumbar kinematics in the unriden horse. In *Equine Veterinary Journal* (Vol. 38, Issue SUPPL.36, pp. 445–451). <https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.2006.tb05585.x>
- Audigié, F., Pourcelot, P., Degueurce, C., Denoix, J. M., & Geiger, D. (1999). Kinematics of the equine back: flexion-extension movements in sound trotting horses. *Equine Veterinary Journal. Supplement*, 30, 210–213. <https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.1999.tb05219.x>
- Audigié, F., Pourcelot, P., Degueurce, C., Geiger, D., & Denoix, J.-M. (2002). Fourier analysis of trunk displacements: A method to identify the lame limb in trotting horses. *Journal of Biomechanics*, 35(9), 1173–1182. [https://doi.org/10.1016/S0021-9290\(02\)00089-1](https://doi.org/10.1016/S0021-9290(02)00089-1)
- Back, W., & Clayton, H. M. (2013). Glossary. In *Equine Locomotion* (2nd ed., pp. xxi–xxiii). Elsevier.
- Barone, R. (1976). *Anatomie comparée des mammifères domestiques. Tome 1er. Ostéologie*. (Vigot.).
- Barone, R. (1980). *Anatomie comparée des mammifères domestiques. Tome 2. Arthrologie et myologie*. (Vigot.).
- Barrey, E. (1999). Methods, applications and limitations of Gait analysis in horses. *Veterinary Journal*, 157(1), 7–22. <https://doi.org/10.1053/tvjl.1998.0297>
- Barrey, E. (2004). Chapter 12 - Biomechanics of locomotion in the athletic horse. In *Equine sports medicine and surgery: basic and clinical sciences of the equine athlete* (pp. 210–230). Saunders.
- Blanville, F. (2016). *Etude cinématique de l'influence de la couverture du fer postérieur sur la locomotion du cheval sur sol meuble* (Issue 14). Faculté de Médecine de Nantes. Oniris : Ecole Nationale Vétérinaire, Agroalimentaire et de l'Alimentation Nantes-Atlantique.
- Buchner, H. H., Savelberg, H. H., Schamhardt, H. C., Merkens, H. W., & Barneveld, A. (1994). Kinematics of treadmill versus overground locomotion in horses. *The Veterinary Quarterly*, 16 Suppl 2, 87–90. <https://doi.org/10.1080/01652176.1994.9694509>
- Carro, M. (2016). *Etude cinématique de l'influence du sol et de la modification de l'angle plantaire sur la locomotion du cheval*. Faculté de Médecine de Nantes. Oniris : Ecole Nationale Vétérinaire, Agroalimentaire et de l'Alimentation Nantes-Atlantique.
- Chateau, H., Degueurce, C., & Denoix, J. M. (2006). Three-dimensional kinematics of the distal forelimb in horses trotting on a treadmill and effects of elevation of heel and toe. *Handbook of Environmental Chemistry, Volume 5: Water Pollution*, 38(2), 164–169. <https://doi.org/10.2746/042516406776563260>
- Chateau, H., Holden, L., Robin, D., Falala, S., Pourcelot, P., Estoup, P., Denoix, J. M., & Crevier-Denoix, N. (2010). Biomechanical analysis of hoof landing and stride parameters

- in harness trotter horses running on different tracks of a sand beach (from wet to dry) and on an asphalt road. *Equine Veterinary Journal*, 42, 488–495.
- Chateau, H., Robin, D., Falala, S., Pourcelot, P., Valette, J.-P., Ravary, B., Denoix, J.-M., & Crevier-Denoix, N. (2009). Effects of a synthetic all-weather waxed track versus a crushed sand track on 3D acceleration of the front hoof in three horses trotting at high speed. *Equine Veterinary Journal*, 41, 247–251.
- Chenot-Hervillard, H. (2015). *Lecture de L'Ecole de Cavalerie (François Robichon de la Guérinière, 1733) au regard des connaissances actuelles en biomécanique et locomotion du cheval*. Ecole Nationale Vétérinaire de Lyon.
- Clayton, H.-M. (1995). Comparison of the stride kinematics of the collected, medium, and extended walks in horses. *American Journal of Veterinary Research*, 56(7), 849–852.
- Clayton, H.-M., & Hobbs, S.-J. (2017). The role of biomechanical analysis of horse and rider in equitation science. *Applied Animal Behaviour Science*.
- Clayton, H. M., & Back, W. (2013). Hind limb function. In *Equine Locomotion* (2nd ed., pp. 127–146). Elsevier.
- Clayton, H. M., Chateau, H., & Back, W. (2013). Fore limb function. In *Equine Locomotion* (2nd ed., pp. 99–126). Elsevier.
- Clayton, H. M., & Schamhardt, H. C. (2001). Measurement Techniques for Gait Analysis. In *Equine locomotion* (WB Saunder, pp. 55–76).
- Corbin, I. (2002). *Intérêt de l'analyse cinématique des allures du cheval pour le vétérinaire et le maréchal-ferrant : étude bibliographique*. Université Claude-Bernard - Lyon 1.
- Crevier-Denoix, N. (2011). Les effets biomécaniques des sols sur l'appareil locomoteur du cheval. In *Equipédia*. www.equipedia.ifce.fr
- Crevier-Denoix, N. (2015a). Concevoir les sols. In *Grand livre du Cheval* (pp. 330–333). Hachette Livre.
- Crevier-Denoix, N. (2015b). Projet Safe Track : évaluation du risque pathogène lié aux pistes équestres. *Équi-Meeting Maréchalerie*, 60–65.
- Crevier-Denoix, N., Chateau, H., Camus, M., Ravary, B., Pauchard, M., van Hamme, A., & Munoz, F. (2015). Comparison of two preparation procedures (harrowing vs rolling) applied to an equestrian sport arena : Effects on the dynamic variables in 3 horses landing after a jump. *Isbs Proceedings*, 1–4.
- Crevier-Denoix, N., Chateau, H., Munoz-Nates, F., Ravary-plumioen, B., Camus, M., Falala, S., Denoix, J.-M., & Pourcelot, P. (2016). Effets biomécaniques des sols sur l'appareil locomoteur du cheval. *Equ'idée*, 2, 1–6. http://www.vet-alfort.fr/automne_modules_files/pmedia/public/r1959_9_equidee-article1-decembre16.pdf
- Crevier-Denoix, N., Pourcelot, P., Holden-Douilly, L., Camus, M., Falala, S., Ravary-Plumioen, B., Vergari, C., Desquilbet, L., & Chateau, H. (2013). Discrimination of two equine racing surfaces based on forelimb dynamic and hoof kinematic variables at the canter. *Veterinary Journal*, 198, 124–129.

- Crevier-Denoix, N., Ravary-Plumioen, B., Vergari, C., Camus, M., Holden-Douilly, L., Falala, S., Jerbi, H., Desquilbet, L., Chateau, H., Denoix, J.-M., & Pourcelot, P. (2013). Comparison of superficial digital flexor tendon loading on asphalt and on deep sand in horses at the walk and trot. *Veterinary Journal*, *198*, 130–136.
- Crevier-Denoix, N., Robin, D., Pourcelot, P., Falala, S., Holden, L., Estoup, P., Desquilbet, L., & Denoix, J.-M., C. H. (2010). Ground reaction force and kinematic analysis of limb loading on two different beach sand tracks in harness trotters. *Equine Veterinary Journal*, *42*, 544–551.
- Crevier-Denoix, N., Robin, D., Pourcelot, P., Ravary, B., Falala, S., Valette, J.-P., Denoix, J.-M., & Chateau, H. (2009). Le Projet Sequisol: Évaluation biomécanique de l'effet des sols équestres sur l'appareil locomoteur du cheval. *Bulletin de l'Académie Vétérinaire de France*, *1*, 133–143. <https://doi.org/10.4267/2042/47986>
- de Cocq, P., Prinsen, H., Springer, N. C. N., van Weeren, P. R., Schreuder, M., Muller, M., & van Leeuwen, J. L. (2009). The effect of rising and sitting trot on back movements and head-neck position of the horse. *Equine Veterinary Journal*, *41*(5), 423–427. <https://doi.org/10.2746/042516409X371387>
- Dendauw, P. (2019). *Influence de la ferrure sur la cinématique de la ligne du dessus chez le cheval, au pas et au trot sur sable*. Faculté de Médecine de Nantes.
- Denoix, J.-M. (1994). Functional anatomy of tendons and ligaments in the distal limbs (manus and pes). *Veterinary Clinics of North America - Equine Practice*, *10*, 273–322.
- Denoix, J.-M. (2014). *Biomécanique et gymnastique du cheval* (Vigot).
- Faber, M., Johnston, C., Schamhardt, H., Van Weeren, R., Roepstorff, L., & Barneveld, A. (2001). Basic three-dimensional kinematics of the vertebral column of horses trotting on a treadmill. *American Journal of Veterinary Research*, *62*(5), 757 – 764.
- Faber, M., Johnston, C., van Weeren, R., & Barneveld, A. (2010). Repeatability of back kinematics in horses during treadmill locomotion. *Equine Veterinary Journal*, *34*(3), 235–241. <https://doi.org/10.2746/042516402776186010>
- Faber, M., Schamhardt, H., Van Weeren, R., & Barneveld, A. (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), 301–306. <https://doi.org/10.2460/ajvr.2001.62.301>
- Faber, M., Schamhardt, H., Van Weeren, R., Johnston, C., Roepstorff, L., & Barneveld, A. (2001). Basic three-dimensional kinematics of the vertebral column of horses walking on a treadmill. *American Journal of Veterinary Research*, *61*(4), 399 – 406.
- FFE. (1994). *Être cavalier Galops 1 à 4 - Manuel officiel de préparation aux brevets fédéraux* (Lavauzelle (ed.)).
- Girodroux, M., Dyson, S., & Murray, R. (2009). Osteoarthritis of the thoracolumbar synovial intervertebral articulations: clinical and radiographic features in 77 horses with poor performance and back pain. *Equine Veterinary Journal*, *41*(2), 130–138.
- Gómez Álvarez, C. B., Bobbert, M. F., Lamers, L., Johnston, C., Back, W., & van Weeren, P. R.

- (2008). The effect of induced hindlimb lameness on thoracolumbar kinematics during treadmill locomotion. *Equine Veterinary Journal*, 40(2), 147–152.
- Gómez Álvarez, C. B., Bobbert, M. F., Lamers, L., Johnston, C., Back, W., & Van Weeren, P. R. (2008). The effect of induced hindlimb lameness on thoracolumbar kinematics during treadmill locomotion. *Equine Veterinary Journal*, 40(2), 147–152. <https://doi.org/10.2746/042516408X250184>
- Gómez Álvarez, C. B., L'Ami, J. J., Moffatt, D., Back, W., & Van Weeren, P. R. (2008). Effect of chiropractic manipulations on the kinematics of back and limbs in horses with clinically diagnosed back problems. *Equine Veterinary Journal*, 40(2), 153–159. <https://doi.org/10.2746/042516408X250292>
- Gómez Álvarez, C. B., Rhodin, M., Byström, A., Back, W., & van Weeren, P. R. (2009). Back kinematics of healthy trotting horses during treadmill versus over ground locomotion. *Equine Veterinary Journal*, 41(3), 297–300. <https://doi.org/10.2746/042516409X397370>
- Gómez Álvarez, C. B., Wennerstrand, J., Bobbert, M. F., Lamers, L., Johnston, C., Back, W., & Van Weeren, P. R. (2007). The effect of induced forelimb lameness on thoracolumbar kinematics during treadmill locomotion. *Equine Veterinary Journal*, 39(3), 197–201. <https://doi.org/10.2746/042516407X173668>
- Groesel, M., Zsoldos, R. R., Kotschwar, A., Gfoehler, M., & Peham, C. (2010). A preliminary model study of the equine back including activity of longissimus dorsi muscle. *Equine Veterinary Journal*, 42(suppl 38), 401–406. <https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.2010.00282.x>
- Gustas, P., Johnston, C., & Drevemo, S. (2006). Ground reaction force and hoof deceleration patterns on two different surfaces at the trot. *Equine and Comparative Exercise Physiology*, 3, 209 – 216.
- Gustas, P., Johnston, C., Roepstorff, L., & Drevemo, S. (2001). In vivo transmission of impact shock waves in the distal forelimb of the horse. *Equine Veterinary Journal*, Suppl. 33, 11–15.
- Hausler, K. K. (1999). Anatomy of the thoracolumbar vertebral region. *Veterinary Clinics of North America : Equine Practice*, 15, 13 – 26.
- Henson, F. M. D. (2009). *Equine Back Pathology: Diagnosis and Treatment*. Wiley-Blackwell.
- Hodgson, D. R., Facsm, B., Harrington, K., & MCGowan, C. M. (2014). *The Athletic Horse* (2nd ed.). Elsevier.
- Johnston, C., Holmt, K., Faber, M., Erichsen, C., Eksell, P., & Drevemo, S. (2002). Effect of conformational aspects on the movement of the equine back. *Equine Veterinary Journal. Supplement*, 34(34), 314–318. <https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.2002.tb05439.x>
- Klaus-Dieter, B., Sack, W. O., Rock, S., Horowitz, A., & Berg, R. (2009). *Anatomy of the horse* (Vol. 170). Veterinary Record.
- Landman, M. A., de Blaauw, J. A., van Weeren, P. R., & Hofland, L. J. (2004). Field study of the prevalence of lameness in horses with back problems. *Veterinary Record*, 155, 165 –

- Leach, D. H., Ormod, K., & Clayton, H. M. (1984). Standardised terminology for the description and analysis of equine locomotion. *Equine Veterinary Journal*, 16(6), 522–528. <https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.1984.tb02007.x>
- Malinvaud, A. (2018). *Intérêt de l'analyse morphométrique géométrique globale du cheval dans l'étude de sa ligne du dessus au pas et au trot : étude expérimentale* (Issue 14). Faculté de Médecine de Nantes. Oniris : Ecole Nationale Vétérinaire, Agroalimentaire et de l'Alimentation Nantes-Atlantique.
- McGreevy, P.-D., & Rogers, L.-J. (2005). Motor and sensory laterality in thoroughbred horses. *Applied Animal Behaviour Science*, 92, 337–352.
- Mickelborough, J., Van Der Linden, M. L., Richards, J., & Ennos, A. R. (2000). Validity and reliability of a kinematic protocol for determining foot contact events. *Gait and Posture*, 11(1), 32–37.
- Miller, C. A., & Verstraete, M. C. (1996). Determination of the step duration of gait initiation using a mechanical energy analysis. *Journal of Biomechanics*, 29(9), 1195–1199. [https://doi.org/10.1016/0021-9290\(96\)00033-4](https://doi.org/10.1016/0021-9290(96)00033-4).
- Mortagne, P. (2016). *Comparaison de la locomotion du cheval ferré et déferré au pas et au trot sur sol meuble par approche cinématique* (Issue 14). Faculté de Médecine de Nantes. Oniris : Ecole Nationale Vétérinaire, Agroalimentaire et de l'Alimentation Nantes-Atlantique.
- Munoz-Nates, F., Pourcelot, P., Ravary-Plumioen, B., Dardillat, C., Denoix, J.-M., Chateau, H., & Crevier-Denoix, N. (2016). Comparison of track surfaces with two different foundations : effects on the dynamic variables measured in one harness horse at a training trot. *Equine Veterinary Journal*, 48, 38.
- Murphy, J., & Arkins, S. (2006). Laterality and visio-spatial ability in the equine: Functional measures of sport horse selection ? *Applying Equine Science: Research into Business*, 35, 159 – 170.
- Oosterlinck, M., Royaux, E., Back, W., & Pille, F. (2014). A preliminary study on pressure-plate evaluation of forelimb toe–heel and mediolateral hoof balance on a hard vs. a soft surface in sound ponies at the walk and trot. *Equine Veterinary Journal*, 46, 751–755.
- Orange, F. (1995). *Contribution à l'étude cinématique tridimensionnelle du trot chez le cheval : influence du tapis roulant sur la locomotion*. Faculté de médecine de Créteil.
- Parks, A. H. (2012). Therapeutic Farriery. One Veterinarian's Perspective. *Veterinary Clinics of North America - Equine Practice*, 28 (2), 333–350.
- Pfau, T., Witte, T. H., & Wilson, A. M. (2005). A method for deriving displacement data during cyclical movement using an inertial sensor. *Journal of Experimental Biology*, 208(13), 2503–2514. <https://doi.org/10.1242/jeb.01658>
- Pilliner, S., Elmhurst, S., & Davies, Z. (2009). The horse in motion: the anatomy and physiology of equine locomotion. *John Wiley & Sons*.
- Poulain, C. (2018). *Etude bibliographique : Arthropathies des vertèbres cervicales du cheval*.

Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse - ENVT.

- Raynor, M. (2006). *The Horse Anatomy Workbook: A Learning Aid for Students Based on Peter Goody's Classic Work, Horse Anatomy* (J. Allen (ed.)).
- Robin, D., Chateau, H., Pacquet, L., Falala, S., Valette, J.-P., Pourcelot, P., Ravary, B., Denoix, J.-M., & Crevier-Denoix, N. (2009). Use of a 3D dynamometric horseshoe to assess the effects of an all-weather waxed track and a crushed sand track at high speed trot: Preliminary study. *Equine Veterinary Journal*, *41*(3), 253–256. <https://doi.org/10.2746/042516409X397965>
- Roethlisberger Holm, K., Wennerstrand, J., Lagerquist, U., Eksell, P., & Johnston, C. (2006). Effect of local analgesia on movement of the equine back. *Equine Veterinary Journal*, *38*(1), 65–69. <https://doi.org/10.2746/042516406775374351>
- Sisson, S. (1975). Equine myology. In *Anatomy of Domestic Animals* (pp. 433 – 435). Saunders.
- Stubbs, N. C., Kaiser, L. J., Hauptman, J., & Clayton, H. M. (2011). Dynamic mobilisation exercises increase cross sectional area of musculus multifidus. *Equine Veterinary Journal*, *43*(5), 522–529. <https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.2010.00322.x>
- Symons, J. E., Garcia, T. C., & Stover, S. M. (2014). Distal hindlimb kinematics of galloping Thoroughbred racehorses on dirt and synthetic racetrack surfaces. *Equine Veterinary Journal*, *46*(2), 227–232.
- Townsend, H. G. G., Leach, D. H., & Fretz, P. B. (1983). Kinematics of the equine thoracolumbar spine. *Equine Veterinary Journal*, *15*, 117 – 122.
- Van Weeren, P. R. (2014). Kinematics of the equine back and pelvis. In *The Athletic Horse: Principles and Practices of Equine Sports Medicine* (2nd ed., pp. 282 – 292). Elsevier.
- Van weeren, P. R., McGowan, C., & Haussler, K. K. (2010). Science overview: Development of a structural and functional understanding of the equine back. *Equine Veterinary Journal*, *42*(SUPPL. 38), 393–400. <https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.2010.00207.x>
- van Weeren, P. R., van den Bogert, A. J., & Barneveld, A. (1990). A quantitative analysis of skin displacement in the trotting horse. *Equine Veterinary Journal (Supplement)*, *9*, 101 – 109.
- Villedéy, E. (2018). *Analyse morphométrique géométrique de la ligne du dessus du cheval : étude expérimentale*. Faculté de Médecine de Nantes. Oniris : Ecole Nationale Vétérinaire, Agroalimentaire et de l'Alimentation Nantes-Atlantique.
- Warner, S. M., Koch, T. O., & Pfau, T. (2010). Inertial sensors for assessment of back movement in horses during locomotion over ground. *Equine Veterinary Journal*, *42*(SUPPL. 38), 417–424. <https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.2010.00200.x>
- Weishaupt, M. A., Wiestner, T., von Peinen, K., Waldern, N., Roepstorff, L., van Weeren, R., & Johnston, C. (2006). Effect of head and neck position on vertical ground reaction forces and interlimb coordination in the dressage horse ridden at walk and trot on a treadmill. *Equine Veterinary Journal*, *38* (Suppl.), 387–392. <https://doi.org/10.16258/j.cnki.1674-5906.2006.01.022>

- Wennerstrand, J. (2008). Clinical Perspectives on Equine Back Kinematics: A biomechanical analysis of the equine back at walk and trot. *Swedish University of Agricultural Sciences*, 2008.
- Wennerstrand, J., Johnston, C., Rhodin, M., Roethlisberger-Holm, K., & Drevemo, S. (2006). The effect of weighted boots on the movement of the back in the asymptomatic riding horse. *Equine and Comparative Exercise Physiology*, 3(1), 13–18. <https://doi.org/10.1079/ecp200680>
- Wennerstrand, J., Johnston, C., Roethlisberger-Holm, K., Erichsen, C., Eksell, P., & Drevemo, S. (2004). Kinematic evaluation of the back in the sport horse with back pain. *Equine Veterinary Journal*, 36(8), 707–711. <https://doi.org/10.2746/0425164044848226>
- Yoshihara, E., Takahashi, T., Otsuka, N., Isayama, T., Tomiyama, T., Hiraga, A., & Wada, S. (2010). Heel movement in horses: Comparison between glued and nailed horse shoes at different speeds. *Equine Veterinary Journal*, 42(SUPPL. 38), 431–435. <https://doi.org/10.1111/j.2042-3306.2010.00243.x>
- Zsoldos, R. R., & Licka, T. F. (2015). The equine neck and its function during movement and locomotion. *Zoology*, 118(5), 364–376. <https://doi.org/10.1016/j.zool.2015.03.005>

INFLUENCE DU SOL SUR LA CINÉMATIQUE DE LA LIGNE DU DESSUS CHEZ LE CHEVAL, AU PAS ET AU TROT : COMPARAISON ENTRE LE SABLE ET L'ASPHALTE

RESUME

La nature du sol sur lequel le cheval évolue revêt une importance toute particulière sur les performances en fonction des disciplines et des préférences individuelles des chevaux. Des études récentes ont mis en évidence l'influence de différents sols sur la cinématique des membres, et sur la pathogénie de certaines affections locomotrices mais leur influence sur la cinématique de la ligne du dessus du cheval est encore peu étudiée.

Cette étude compare les angles de flexion et d'extension de différentes régions du dos chez six chevaux ferrés à différentes phases de la foulée de dos, au pas et au trot, sur deux conditions de sol différentes : sur sable et sur asphalte.

Les résultats confirment l'influence du sol sur la cinématique de la ligne du dessus, avec notamment une augmentation de l'extension cervicale moyenne, de la flexion cervico-thoracique, de l'extension thoraco-lombaire et de la flexion lombo sacrée au pas et au trot sur sol souple. Au trot, le balancier cervico-thoracique est abaissé sur sol souple. Une hypothèse d'équilibre automatique lié à la biomécanique est soulevée : une augmentation de l'angle lombo-sol s'accompagne d'une augmentation de l'angle lombo-sacré, indépendamment des variations de flexion-extension du segment sacré au court de la foulée.

Ces résultats permettent d'envisager les conséquences de certaines conditions de sol sur le dos d'un cheval de sport. Des études complémentaires sont nécessaires pour compléter et mieux comprendre ces observations, et pour pouvoir extrapoler les résultats aux chevaux de course et de sport dorsalgiques.

MOTS CLES

cheval – locomotion – cinématique – dos – sol – allure

JURY

Président : Monsieur Yves MAUGARS – Professeur à la faculté de Médecine de Nantes

Rapporteur : Madame Caroline TESSIER – Maître de conférences à l'École Nationale Vétérinaire, Agroalimentaire et de l'Alimentation, Nantes Atlantique (Oniris)

Assesseur : Monsieur Claude GUINTARD – Maître de conférences à l'École Nationale Vétérinaire, Agroalimentaire et de l'Alimentation, Nantes Atlantique (Oniris)

Membre invité : Monsieur Sébastien CAURE – Docteur vétérinaire au Centre Hospitalier Vétérinaire Equin de Livet (14)

Louise Thésé
21 rue Jean Delalande
35400 Saint Malo

COREP Jonelière Nantes