

**VETAGRO SUP
CAMPUS VETERINAIRE DE LYON**

Année 2015 - Thèse n°

***ETUDE RETROSPECTIVE DES EFFETS DE TROIS TYPES DE
FERRURES ORTHOPEDIQUES SUR LA MALADIE
NAVICULAIRE A PARTIR D'UN QUESTIONNAIRE AUPRES
DE MARECHAUX FERRANTS***

THESE

Présentée à l'UNIVERSITE CLAUDE-BERNARD - LYON I
(Médecine - Pharmacie)
et soutenue publiquement le 16 octobre 2015
pour obtenir le grade de Docteur Vétérinaire

par

du LAU d'ALLEMANS Stanislas
Né le 6 février 1991
à Périgueux (24)



VetAgro Sup



**VETAGRO SUP
CAMPUS VETERINAIRE DE LYON**

Année 2015 - Thèse n°

***ETUDE RETROSPECTIVE DES EFFETS DE TROIS TYPES DE
FERRURES ORTHOPEDIQUES SUR LA MALADIE
NAVICULAIRE A PARTIR D'UN QUESTIONNAIRE AUPRES
DE MARECHAUX FERRANTS***

THESE

Présentée à l'UNIVERSITE CLAUDE-BERNARD - LYON I
(Médecine - Pharmacie)
et soutenue publiquement le 16 octobre 2015
pour obtenir le grade de Docteur Vétérinaire

par

du LAU d'ALLEMANS Stanislas
Né le 6 février 1991
à Périgueux (24)



VetAgro Sup



LISTE DES ENSEIGNANTS DU CAMPUS VÉTÉRIINAIRE DE LYON

Mise à jour le 09 juin 2015

Civilité	Nom	Prénom	Unités pédagogiques	Grade
M.	ALOGNINOUIWA	Théodore	UP Pathologie du bétail	Professeur
M.	ALVES-DE-OLIVEIRA	Laurent	UP Gestion des élevages	Maître de conférences
Mme	ARCANGIOLI	Marie-Anne	UP Pathologie du bétail	Maître de conférences
M.	ARTOIS	Marc	UP Santé Publique et Vétérinaire	Professeur
M.	BARTHELEMY	Anthony	UP Anatomie Chirurgie (ACSAI)	Maître de conférences Contractuel
Mme	BECKER	Claire	UP Pathologie du bétail	Maître de conférences
Mme	BELLUCO	Sara	UP Pathologie morphologique et clinique des animaux de compagnie	Maître de conférences
Mme	BENAMOU-SMITH	Agnès	UP Equine	Maître de conférences
M.	BENOIT	Etienne	UP Biologie fonctionnelle	Professeur
M.	BERNY	Philippe	UP Biologie fonctionnelle	Professeur
Mme	BERTHELET	Marie-Anne	UP Anatomie Chirurgie (ACSAI)	Maître de conférences
Mme	BONNET-GARIN	Jeanne-Marie	UP Biologie fonctionnelle	Professeur
Mme	BOULOCHER	Caroline	UP Anatomie Chirurgie (ACSAI)	Maître de conférences
M.	BOURDOISEAU	Gilles	UP Santé Publique et Vétérinaire	Professeur
M.	BOURGOIN	Gilles	UP Santé Publique et Vétérinaire	Maître de conférences
M.	BRUYERE	Pierre	UP Biotechnologies et pathologie de la reproduction	Maître de conférences
M.	BUFF	Samuel	UP Biotechnologies et pathologie de la reproduction	Maître de conférences
M.	BURONFOSSE	Thierry	UP Biologie fonctionnelle	Professeur
M.	CACHON	Thibaut	UP Anatomie Chirurgie (ACSAI)	Maître de conférences
M.	CADORE	Jean-Luc	UP Pathologie médicale des animaux de compagnie	Professeur
Mme	CALLAIT-CARDINAL	Marie-Pierre	UP Santé Publique et Vétérinaire	Maître de conférences
M.	CAROZZO	Claude	UP Anatomie Chirurgie (ACSAI)	Maître de conférences
M.	CHABANNE	Luc	UP Pathologie médicale des animaux de compagnie	Professeur
Mme	CHALVET-MONFRAY	Karine	UP Biologie fonctionnelle	Professeur
M.	COMMUN	Loïc	UP Gestion des élevages	Maître de conférences
Mme	DE BOYER DES ROCHES	Alice	UP Gestion des élevages	Maître de conférences
Mme	DELIGNETTE-MULLER	Marie-Laure	UP Biologie fonctionnelle	Professeur
M.	DEMONT	Pierre	UP Santé Publique et Vétérinaire	Professeur
Mme	DESJARDINS PESSON	Isabelle	UP Equine	Maître de conférences Contractuel
Mme	DJELOUADJI	Zorée	UP Santé Publique et Vétérinaire	Maître de conférences
Mme	ESCRIOU	Catherine	UP Pathologie médicale des animaux de compagnie	Maître de conférences
M.	FAU	Didier	UP Anatomie Chirurgie (ACSAI)	Professeur
Mme	FOURNEL	Corinne	UP Pathologie morphologique et clinique des animaux de compagnie	Professeur
M.	FREYBURGER	Ludovic	UP Santé Publique et Vétérinaire	Maître de conférences
M.	FRIKHA	Mohamed-Ridha	UP Pathologie du bétail	Maître de conférences
Mme	GILOT-FROMONT	Emmanuelle	UP Santé Publique et Vétérinaire	Professeur
M.	GONTHIER	Alain	UP Santé Publique et Vétérinaire	Maître de conférences
Mme	GRAIN	Françoise	UP Gestion des élevages	Professeur
M.	GRANCHER	Denis	UP Gestion des élevages	Maître de conférences
Mme	GREZEL	Delphine	UP Santé Publique et Vétérinaire	Maître de conférences
M.	GUERIN	Pierre	UP Biotechnologies et pathologie de la reproduction	Professeur
Mme	HUGONNARD	Marine	UP Pathologie médicale des animaux de compagnie	Maître de conférences
M.	JUNOT	Stéphane	UP Anatomie Chirurgie (ACSAI)	Maître de conférences
M.	KECK	Gérard	UP Biologie fonctionnelle	Professeur
M.	KODJO	Angeli	UP Santé Publique et Vétérinaire	Professeur
Mme	LAABERKI	Maria-Halima	UP Santé Publique et Vétérinaire	Maître de conférences
M.	LACHERETZ	Antoine	UP Santé Publique et Vétérinaire	Professeur
Mme	LAMBERT	Véronique	UP Gestion des élevages	Maître de conférences
Mme	LATTARD	Virginie	UP Biologie fonctionnelle	Maître de conférences
Mme	LE GRAND	Dominique	UP Pathologie du bétail	Professeur
Mme	LEBLOND	Agnès	UP Santé Publique et Vétérinaire	Professeur
Mme	LEFRANC-POHL	Anne-Cécile	UP Equine	Maître de conférences
M.	LEPAGE	Olivier	UP Equine	Professeur
Mme	LOUZIER	Vanessa	UP Biologie fonctionnelle	Maître de conférences
M.	MARCHAL	Thierry	UP Pathologie morphologique et clinique des animaux de compagnie	Professeur
M.	MOUNIER	Luc	UP Gestion des élevages	Maître de conférences
M.	PEPIN	Michel	UP Santé Publique et Vétérinaire	Professeur
M.	PIN	Didier	UP Pathologie morphologique et clinique des animaux de compagnie	Maître de conférences
Mme	PONCE	Frédérique	UP Pathologie médicale des animaux de compagnie	Maître de conférences
Mme	PORTIER	Karine	UP Anatomie Chirurgie (ACSAI)	Maître de conférences
Mme	POUZOT-NEVORET	Céline	UP Anatomie Chirurgie (ACSAI)	Maître de conférences
Mme	PROUILLAC	Caroline	UP Biologie fonctionnelle	Maître de conférences
Mme	REMY	Denise	UP Anatomie Chirurgie (ACSAI)	Professeur
Mme	RENE MARTELLET	Magalie	UP Santé Publique et Vétérinaire	Maître de conférences stagiaire
M.	ROGER	Thierry	UP Anatomie Chirurgie (ACSAI)	Professeur
M.	SABATIER	Philippe	UP Biologie fonctionnelle	Professeur
M.	SAWAYA	Serge	UP Anatomie Chirurgie (ACSAI)	Maître de conférences
M.	SCHRAMME	Serge	UP Equine	Professeur associé
Mme	SEGARD	Emilie	UP Anatomie Chirurgie (ACSAI)	Maître de conférences Contractuel
Mme	SERGENTET	Delphine	UP Santé Publique et Vétérinaire	Maître de conférences
Mme	SONET	Juliette	UP Anatomie Chirurgie (ACSAI)	Maître de conférences Contractuel
M.	THIEBAULT	Jean-Jacques	UP Biologie fonctionnelle	Maître de conférences
M.	TORTEREAU	Antonin	UP Pathologie morphologique et clinique des animaux de compagnie	Maître de conférences stagiaire
M.	VIGUIER	Eric	UP Anatomie Chirurgie (ACSAI)	Professeur
Mme	VIRIEUX-WATRELOT	Dorothée	UP Pathologie morphologique et clinique des animaux de compagnie	Maître de conférences Contractuel
M.	ZENNER	Lionel	UP Santé Publique et Vétérinaire	Professeur

REMERCIEMENTS

A Madame le Professeur Elvire SERVIEN,

De la Faculté de médecine de Lyon,

Qui nous a fait l'honneur d'accepter la présidence de notre jury de thèse,
Qu'elle reçoive ici l'expression de mes hommages respectueux.

A Monsieur le Docteur Olivier LEPAGE,

De VetAgro Sup – Campus vétérinaire de Lyon,

Pour avoir suivi l'élaboration de ce travail,
Pour sa disponibilité et ses précieux conseils,
Profonds remerciements.

A Madame le Docteur Monika GANGL,

De VetAgro Sup – Campus vétérinaire de Lyon,

Pour nous avoir proposé ce sujet passionnant,
Pour sa disponibilité, sa gentillesse et son soutien tout au long de notre travail,
Qu'elle trouve ici le témoignage de ma reconnaissance et de ma sincère gratitude.

A Madame le Docteur Caroline BOULOCHER,

De VetAgro Sup – Campus vétérinaire de Lyon,

Qui a aimablement accepté de faire partie de mon jury de thèse,
Sincères remerciements.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	5
TABLE DES MATIERES	7
TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	9
LISTE DES TABLEAUX	13
LISTE DES ANNEXES	8
LISTE DES ABREVIATIONS	15
INTRODUCTION	17
PARTIE 1 : Rappels sur la maladie naviculaire	19
I. Rappels anatomiques et définition du syndrome naviculaire.....	19
A. Historique	19
B. Anatomie de l'appareil podotrochléaire	20
II. Etiologie de la Maladie Naviculaire	33
A. Epidémiologie	33
B. Mécanismes physiopathologiques	34
III. Lésions de l'os naviculaire et des structures associées.....	38
A. Au niveau de la face palmaire de l'os naviculaire	38
B. Au niveau du bord distal de l'os naviculaire.....	39
C. Au niveau des structures associées.....	39
D. Ce qu'il faut retenir des lésions... ..	41
IV. Clinique du Syndrome Podotrochléaire	42
A. Anamnèse.....	42
B. Examen Statique.....	42
C. Examen Dynamique.....	44
D. Anesthésies sémiologiques	46
V. Examens complémentaires d'imagerie	52
A. Diagnostic radiographique	52
B. Autres examens complémentaires d'imagerie.....	61
VI. Traitement du syndrome podotrochléaire.....	64
A. Traitement médical	64
B. Traitement orthopédique.....	66
C. Traitement chirurgical	66

PARTIE 2 : Etude biomécanique du syndrome podotrochléaire.....	71
I. Etude biomécanique des différentes phases de la foulée	69
A. Dynamique des forces appliquées au pied durant la phase d'appui	69
B. Fonctionnement dynamique du pied.....	79
C. Contraintes ostéo-articulaires.....	84
II. Considérations biomécaniques du syndrome podotrochléaire	87
A. Influences de la forme de l'os sésamoïdien distal.....	87
B. Influence du poser en pince	88
C. Influence de la conformation du pied	90
D. Influence du parage et de la ferrure	91
III. Traitement orthopédique du syndrome podotrochléaire	93
A. Principes du traitement orthopédique.....	93
B. Parage.....	93
C. Ferrures orthopédiques.....	95
D. Protocole de ferrure	100
PARTIE 3 : Enquête autour du protocole de ferrure face au syndrome podotrochléaire auprès de maréchaux ferrants.....	105
I. Matériel et Méthode	103
A. Population concernée	103
B. Elaboration du questionnaire.....	104
II. Résultats.....	105
A. Données générales.....	105
B. Fers orthopédiques utilisés	106
C. Relation avec le vétérinaire.....	107
D. Protocole de ferrure	109
E. Suivi du protocole.....	111
III. Discussion	114
CONCLUSION.....	121
BIBLIOGRAPHIE.....	122
ANNEXES.....	129

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Questionnaire envoyé aux maréchaux ferrants	129
--	-----

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Vue palmaro-proximale de l'os naviculaire et de son interaction avec les phalanges moyenne et distale.....	21
Figure 2 : Vue distal de l'os naviculaire et de son interaction avec les phalanges moyenne et distale	22
Figure 3 : Coupe sagittale de la région naviculaire (à gauche) et son schéma interprétatif (à droite).	23
Figure 4 : Image échographique de la bourse naviculaire par abord proximo-palmaire.....	24
Figure 5 : Schéma des ligaments du pied en vue dorso-latérale (à gauche) et latéromédiale (à droite)	25
Figure 6 : Schéma des ligaments chondro-coronaux (1, 2, 3, 4) qui stabilisent le cartilage unguaire .	26
Figure 7 : Vue palmaire de la vascularisation du Pied.....	27
Figure 8 : Irrigation et innervation du membre distal du cheval.....	28
Figure 9 : Préparations après injection-corrosion des veines et artères du pied, vues latérale (à gauche) et dorsale (à droite)	29
Figure 10 : Schéma de l'irrigation artérielle d'un os naviculaire sain	31
Figure 11 : Schéma de la vue latérale d'une section sagittale d'un os naviculaire sain.....	31
Figure 12 : Schéma de la vue latérale d'une section sagittale d'un os naviculaire	36
Figure 13 : Site d'injection de l'anesthésie péri-nerveuse digitale distale	47
Figure 14 : Site d'injection de l'anesthésie intra-articulaire interphalangienne distale	48
Figure 15 : Schémas de l'injection de la bourse naviculaire par l'approche palmaire distale	49
Figure 16 : Positionnement de la cassette et du faisceau des rayons X lors d'une vue latéromédiale du pied.....	52
Figure 17 : Vue dorsoproximale-palmarodistale (DPr-PaDiO) 85° oblique (85° upright view) à gauche, et la position de l'os naviculaire résultant sur la radiographie à droite.....	53
Figure 18 : Vue palmaroproximale-palmarodistale oblique ("Skyline").....	54
Figure 19 : Image radiographique d'une vue dorsoproximale-palmarodistale 65° oblique	55
Figure 20 : Schéma de l'image radiographique d'une dorsoproximale-palmarodistale 65° oblique....	55
Figure 21 : Image radiographique d'une vue palparoproximale-palmarodistale oblique	56
Figure 22 : Schéma de l'image radiographique d'une vue palparoproximale-palmarodistale oblique	56
Figure 23 : Schéma de l'image radiographique de l'os naviculaire en vue DPr-PaDi-65°O ("upright view").....	57
Figure 24 : Vue latéromédiale d'un os naviculaire ayant une extension proximale et distale du cortex fléchisseur.	58
Figure 25 : Vue palmaroproximale-palmarodistale oblique d'un os naviculaire présentant une lésion radiotransparente (flèche) dans le cortex fléchisseur, abaxialement à la crête sagittale.	58
Figure 26 : Images radiographiques d'un os naviculaire	59
Figure 27 : Les différents temps de la phase d'appui.....	70
Figure 28 : Comparaison des décélérations verticales (m.s-2) lors du poser du sabot (choc à l'impact).	71
Figure 29 : Comparaison des décélérations verticales (m.s-2) lors du poser du sabot (choc à l'impact) mesurées chez le même cheval (cheval 1) se déplaçant à la vitesse de 9,7 m/s (35 km/h) sur une piste en mâchefer dont trois portions ont été préparées de façon différente : état « brut » (portion fermée et laissée sans entretien quelques jours), hersé, hersé et arrosé.....	72

Figure 30 : Comparaison des forces maximales de freinage et de leur instant de survenue au cours de la phase d'appui, lors de tests effectués sur différentes pistes, avec le même cheval à 9,7 m/s (35 km/h).....	73
Figure 31 : Evolution des oscillations de la décélération lors des différentes phases de la foulée.	74
Figure 32 : Composante horizontale de la force de réaction du sol mesurée chez un cheval au trot à 9,7 m/s (35 km/h) sur deux pistes différentes (sable fibré-huilé - F, sable concassé - S).....	75
Figure 33 : Composante verticale de la force de réaction du sol mesurée chez un cheval au trot à 9,7 m/s (35 km/h) sur deux pistes différentes (sable fibré-huilé - F, sable concassé - S).....	75
Figure 34 : Schéma des moments de force s'appliquant sur le centre de rotation de l'articulation interphalangienne distale durant l'appui. La force de réaction exercée par le sol (GRF) agit sur le <i>Point of Zero Moment (PZM)</i> et est responsable d'un moment extenseur. Celui-ci est contrebalancé par un moment fléchisseur dû à la force du tendon fléchisseur profond (F_{TFPD}). d et b sont les bras de levier respectifs de la GRF et de la F_{TFPD}	76
Figure 35 : Schéma des forces s'exerçant dans le pied	77
Figure 36 : Schéma de la déformation et du mouvement du sabot et de la phalange distale lors de la phase d'appui. La ligne rouge représente la position du sabot lors du support du poids du cheval....	80
Figure 37 : Schéma de l'hémodynamique du pied. Les barres appuient sur la saillie axiale de la face interne des cartilages, provoquant leur rotation abaxiale. Ce mouvement est à l'origine de la pression négative enregistrée dans le coussinet digital.	81
Figure 38 : Fonctionnement du sabot en temps qu'amortisseur hydropneumatique.....	83
Figure 39 : Contraintes subies par la phalange distale au cours des phase d'amortissement et de support	85
Figure 40 : Contraintes exercées sur l'os naviculaire lors de l'amortissement (à gauche) et de la propulsion (à droite).....	86
Figure 41 : Tension des ligaments sésamoïdiens collatéraux et distal impair lors des phases de support (A), de propulsion (B) et lors de la phase de support avec une flexion anormale de l'AIPP (C)	86
Figure 42 : Schéma des forces s'appliquant sur la phalange distale lorsque le cheval pose le pied en pince (à gauche) ou en talons (à droite).	88
Figure 43 : Tournure antérieure d'un fer en aluminium Rocking Support® de Michel Vaillant : rocking (biseau postérieur) et rolling (biseau antérieur).	97
Figure 44 : Tournure antérieure d'un fer en aluminium Bonapartix® : absence de pince et extrémités des branches amincies pour favoriser le roulement. Rocking et rolling associés.....	100
Figure 45 : Tournure antérieure d'un fer en aluminium JMD Onionix® : la couverture des éponges est élargie pour diminuer l'enfoncement des talons. Rolling associé en pince.....	100
Figure 46 : Catégorie sportive des chevaux naviculaires	105
Figure 47 : Proportion de chevaux atteints du syndrome naviculaire dans la clientèle des maréchaux ferrants.....	105
Figure 48 : Raisons principales du choix d'utilisation de chacun des trois types de fers étudiés.	107
Figure 49 : Informations données par le vétérinaire au maréchal suite au diagnostic d'un syndrome naviculaire en vue de mettre en place une ferrure orthopédique	108
Figure 50 : Informations que le maréchal souhaite recevoir de la part du vétérinaire afin de mettre en place la ferrure la plus adaptée.....	108

Figure 51 : Graphiques représentant le temps de ferrure généralement appliqué par les maréchaux ferrants (à gauche) et comment se situe ce délai par rapport à un cheval sain ferré normalement (à droite).....	109
Figure 52 : Carte factorielle des modalités étudiées (grade de boiterie, origine du syndrome naviculaire, type de fer posé, fer en aluminium et compensés, ajout de plaques et de silicone et ajusture à la française) lorsque l'on étudie l'axe 1. Le chiffre 1 est utilisé lorsque la variable étudiée est employée.	110
Figure 53 : Préférences d'utilisation des talonnettes en fonction du grade et de l'origine du syndrome podotrochléaire.....	111
Figure 54 : Moyenne arithmétique et écarts types des rangs d'efficacité (de 1 à 3) obtenus par chacun des fers suites au classement réalisé par les maréchaux.....	113
Figure 55 : Diagramme évaluant la reprise de l'activité sportive au niveau atteint avant le diagnostic de la maladie naviculaire.....	113

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Interprétation des résultats des anesthésies de l'articulation interphalangienne distale et de la bourse naviculaire	51
Tableau 2 : Lésions radiographiques observées lors de maladie naviculaire en les classant par grade de sévérité.....	60
Tableau 3 : Proposition générale de fers kinésithérapiques selon le grade du handicap fonctionnel chez les chevaux atteints de syndrome podotrochléaire, d'après (Denoix, 2002).	101
Tableau 4 : Pourcentage d'utilisation par les maréchaux ferrants des fers orthopédiques étudiés (fer à l'envers, egg-bar et fer à oignons).....	106
Tableau 5 : Fréquence d'utilisation des trois fers orthopédiques étudiés (fer à l'envers, egg-bar et fer à oignons) par les maréchaux ferrants.....	106

LISTE DES ABREVIATIONS

TFPD : tendon du muscle fléchisseur profond du doigt

TFSD : tendon du muscle fléchisseur superficiel du doigt

LSB : Ligament suspenseur du boulet

LSCs : Ligaments sésamoïdiens collatéraux de l'os naviculaire distal

LSDI : Ligament sésamoïdien distal impair

AIPD : Articulation interphalangienne distale

AIPP : Articulation interphalangienne proximale

PZM : *Point of Zero Moment*, ou centre de pression statique

GRF : *Ground Reaction Force*, ou force de réaction du sol

MCP : métacarpo-phalangienne (articulation)

IRM : Imagerie par résonance magnétique

INTRODUCTION

« No Foot, No Horse ». Cet adage, prononcé pour la première fois en 1752 par Jeremiah Bridges, met en avant le rôle crucial joué par le système locomoteur du cheval. Pendant soixante millions d'années les chevaux se sont adaptés à leur environnement pour pouvoir fuir sur tous types de sols. C'est au Moyen Âge que l'homme commence à les ferrer car l'urine qui s'accumulait dans les stalles où ils vivaient détruisait la corne à cause de l'ammoniac. La pratique de la maréchalerie se développe alors et permet de mimer l'usure naturelle de la corne. L'usage des fers se répand progressivement car ils protègent les pieds des chevaux lors de travail intense. De nos jours, la ferrure peut désormais être utilisée à des fins thérapeutiques pour corriger des défauts d'aplombs ou favoriser la bonne évolution d'affections locomotrices.

L'application d'une ferrure orthopédique efficace constitue une étape primordiale du traitement de certaines affections touchant le sabot ou les structures du pied et de la partie distale des membres des chevaux. Les progrès techniques en matière de traitement kinésithérapique au cours des dernières décennies permettent un grand choix de ferrure. Il n'est cependant pas aisé d'harmoniser les différents points de vues des professionnels, vétérinaires et maréchaux ferrants, quant à l'utilisation de chacun de ces fers. La maladie naviculaire, dont la pathogénie exacte reste encore à définir, est une affection locomotrice qui n'échappe pas à ces difficultés.

Ce travail vise à mettre en évidence les différents protocoles de ferrures utilisés en première intention par les maréchaux ferrants sur des chevaux atteints de la maladie naviculaire. Il s'intéresse tout particulièrement à l'utilisation des ferrures orthopédiques de type egg-bar, fer à l'envers ou fer à oignons afin de déterminer quel protocole de ferrure semble le plus intéressant selon le grade de la maladie. Pour cela une enquête a été mise en place par la réalisation d'un questionnaire destiné aux maréchaux ferrants.

La première partie fait le point sur les connaissances actuelles concernant la maladie naviculaire. La deuxième partie étudie de manière plus approfondie l'importance des phénomènes biomécaniques dans la compréhension de la pathogénie de la maladie et dans l'établissement par la suite d'un traitement orthopédique adéquat. Enfin, la dernière partie est dédiée à l'analyse des réponses au questionnaire des quarante six maréchaux ferrants ayant participé à l'étude.

PARTIE 1 : Rappels sur la maladie naviculaire

I. Rappels anatomiques et définition du syndrome naviculaire

A. Historique

La première référence à la maladie naviculaire dans la littérature se retrouve dans la parution du « Grand Maréchal, Expert et Français » datant de 1701 (Hickman, 1989). La maladie naviculaire est alors définie comme étant une érosion de l'os naviculaire et que le seul traitement de cette maladie, jugée incurable par l'auteur, serait la névrectomie.

On retrouve une deuxième référence historique lors de l'essai de Jeremiah Bridges publié en 1752 à Londres dont le titre célèbre « No Foot, No Horse » montre l'importance de l'intégrité du système locomoteur chez le cheval (MacGregor, 1989; Pool et al., 1989).

Ainsi on a longtemps défini la maladie naviculaire comme étant une atteinte dégénérative de l'os naviculaire, de la bourse naviculaire et du tendon du muscle fléchisseur profond du doigt qui se manifeste par une boiterie chronique le plus souvent bilatérale des antérieurs, caractérisée par une douleur dans la région palmaire du pied (Pool et al., 1989; Stashak, 2002).

Cependant plus de trois siècles après sa découverte, la maladie naviculaire fait encore débat quant à sa définition, son étiologie, sa pathogénie, ainsi que son traitement. Jamais une maladie n'a suscité autant de controverses et de confusions comme en témoignent les titres des publications suivantes : « Navicular Disease – In search of definition » (MacGregor, 1989), « Navicular Disease – What are we talking about ? » (Hickman, 1989), « Navicular Disease or Navicular Syndrome ? » (Jones, 2004), « Navicular Disease, a review of what's new » (Rijkenhuizen, 2006), « Currents concepts of Navicular Disease » (Dyson et al., 2011).

La difficulté d'établir une cause spécifique et une étio-pathogénie précise avec un traitement unique, a poussé les auteurs à utiliser désormais le terme de « syndrome naviculaire », qui indique que plusieurs conditions pathologiques dans la région de l'os naviculaire peuvent causer les mêmes symptômes.

L'apparition de nouveaux moyens technologiques de diagnostic comme l'échographie, l'IRM (Imagerie par Résonance Magnétique) ou encore l'histopathologie a permis de mieux caractériser les lésions observées jusque là par radiographie au niveau de l'os naviculaire et de la bourse d'une part mais également au niveau des tissus mous adjacents tels que le TFPD, les LSC latéral et le LSDI (Dyson et al., 2011; Jones, 2002).

En effet selon Sue Dyson, une desmite des LSCs ou une tendinite du TFPD autour de l'os naviculaire pourraient être à l'origine de la maladie naviculaire (Dyson, Ross and Dyson,

2010, chap. 30). De même la desmite du LSDI serait une cause d'inflammation locale de l'os naviculaire selon Schneider (Schneider et al., 2003). Il exclut en revanche la tendinite du TFPD de la liste des causes du syndrome naviculaire lorsqu'elle est proximale à l'os sésamoïdien distal. Il suggère qu'un traitement différent des chevaux ayant une dégénérescence de l'os naviculaire soit alors mis en place.

Il apparaît donc important de définir les limites de ce syndrome. Pour certains auteurs, le terme de « maladie naviculaire » est employé lorsque l'on a des lésions de fibrillation du TFPD, avec ou sans adhérences avec l'os naviculaire, ainsi que des érosion du fibrocartilage de l'os, mais également lorsqu'il y a une atteinte des LSCs, du LSDI ou de la bourse naviculaire (Dyson et al., 2011; Rijkenhuizen et al., 1989).

Cependant d'autres préfèrent émettre des réserves quant à l'implication des lésions des tissus adjacents (LSCs et LSDI) dans l'expression des signes cliniques : face à la découverte de plusieurs types de lésions au niveau de la région naviculaire il est difficile de savoir laquelle est responsable des signes cliniques (Rijkenhuizen, 2006; Schneider et al., 2003).

Il conviendrait de nommer l'expression clinique comme étant le « syndrome palmaire du pied » avant de faire des examens complémentaires poussés afin de définir quelles sont la ou les structures en cause (Rijkenhuizen, 2006).

Nous définirons dans cet ouvrage la « maladie naviculaire » comme étant une maladie s'exprimant cliniquement par une boiterie chronique, mais d'apparition parfois aiguë, le plus souvent bilatérale, intervenant majoritairement sur les antérieurs, même si certains postérieurs peuvent être atteints (Dyson et al., 2011; MacGregor, 1989). Elle est caractérisée par une douleur dans la région palmaire du pied et des lésions dégénératives atteignant l'os naviculaire et la face dorsale du TFPD palmairement à l'os, mais également les LSCs, le LSDI et la bourse naviculaire.

B. Anatomie de l'appareil podotrochléaire

Il convient de définir anatomiquement la région naviculaire afin d'établir les relations entre les différentes structures présentes.

1. Myoarthrosquelettique

a) Ostéologie de l'os naviculaire

L'os sésamoïde distal est fréquemment appelé « os naviculaire » en raison de sa forme de « navette ». Il est aplati, de forme cuboïde, et est allongé dans le plan transversal. Il est constitué de deux faces et de deux bords (cf Figure 1 et Figure 2).

Sa face dorsale (*Facies articularis*) est en contact avec l'articulation inter-phalangienne distale. Elle est recouverte d'un cartilage hyalin.

Sa face palmaire (*Facies Flexoria*) est en contact avec le tendon du muscle fléchisseur profond dont elle est séparée par une structure synoviale, la bourse podotrochléaire, qui

permet le glissement du tendon sur la face palmaire de l'os naviculaire. Cette face est de forme convexe et présente un relief sagittal (Kainer, Stashak, 2002, chap. 1). Elle est recouverte de fibrocartilage.

Ces deux faces sont séparées par deux bords :

- Le bord proximal (*Margo proximalis*) sert d'attache aux ligaments sésamoïdiens collatéraux latéral et médial dont l'insertion proximale se situe sur les extrémités respectives de la phalange proximale.
- Le bord distal (*Margo distalis*) est le site d'insertion du ligament sésamoïdien distal impair qui unit étroitement l'os naviculaire à la phalange distale.

L'os naviculaire complète le côté palmaire de l'articulation inter-phalangienne distale :

- Par sa face dorsale il répond à la tête articulaire de P2
- Par son bord distal il répond au bord palmaire de P3



Figure 1 : Vue palmaro-proximale de l'os naviculaire et de son interaction avec les phalanges moyenne et distale

(d'après J.M. Denoix, 2000)

1 Phalange Moyenne (P2)

1a Flexor tuberosity

2 Phalange distale (P3)

2a Processus palmaire

3 Os sésamoïdien distal

3a Face palmaire

3b Face dorsale, en lien avec P2

3c Angle Latéral

3d Angle Médial

3e Bord Proximal

3f Bord Distal, en lien avec P3

3g Crête sagittale

4 Articulation interphalangienne distale

5 Ligaments sésamoïdiens collatéraux

6 Ligament sésamoïdien distal impair

7 Cartilage unguilaire

8 Ligament chondro-sésamoïdien

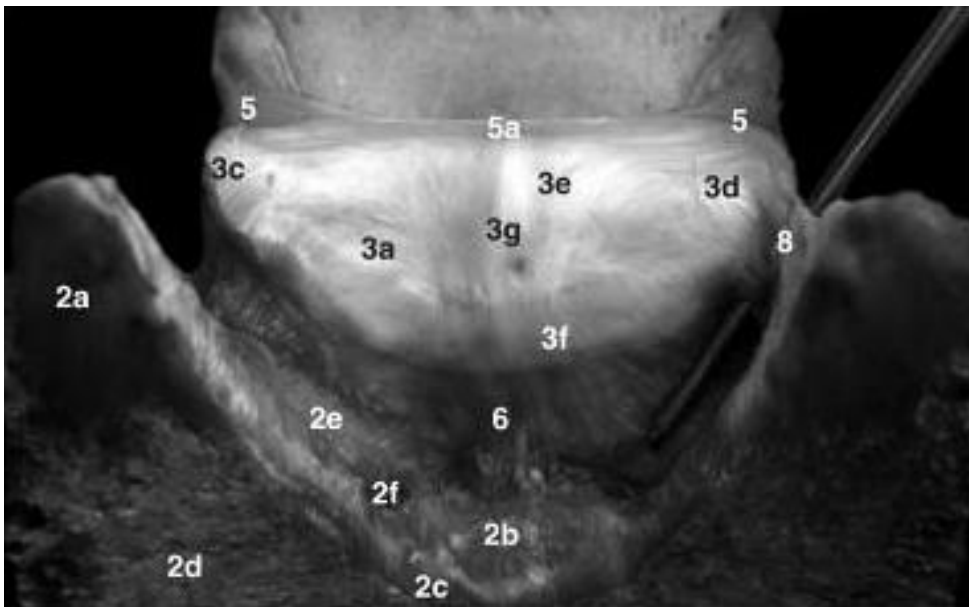
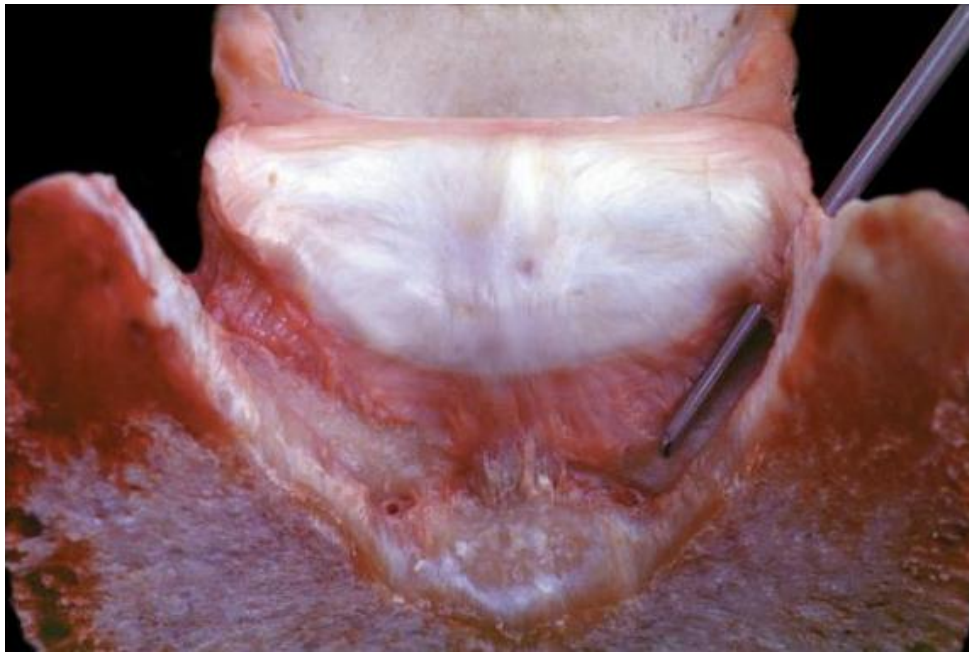


Figure 2 : Vue distale de l'os naviculaire et de son interaction avec les phalanges moyenne et distale

(d'après J.M. Denoix, 2000)

Cf Figure 1

b) L'appareil podotrochléaire

L'appareil podotrochléaire est centré autour de l'os naviculaire qui sert de véritable poulie au TFPD lors de la foulée, notamment lors de la dernière phase de soutien où le glissement du tendon sur la face palmaire de l'os sésamoïdien distal permet la bascule du pied et la propulsion.

L'appareil podotrochléaire est donc constitué de l'os sésamoïdien distal, de la bourse naviculaire, du TFPD, des ligaments sésamoïdiens collatéraux (médial et latéral), et du ligament sésamoïdien distal impair (cf Figure 3).

- La bourse naviculaire

La bourse naviculaire est une structure synoviale située entre la face palmaire de l'os sésamoïdien distal et le tendon fléchisseur profond. Elle est constituée de deux récessus : un proximal et un distal. On remarque qu'il n'y a aucune connexion entre les synoviales du pied et du naviculaire.

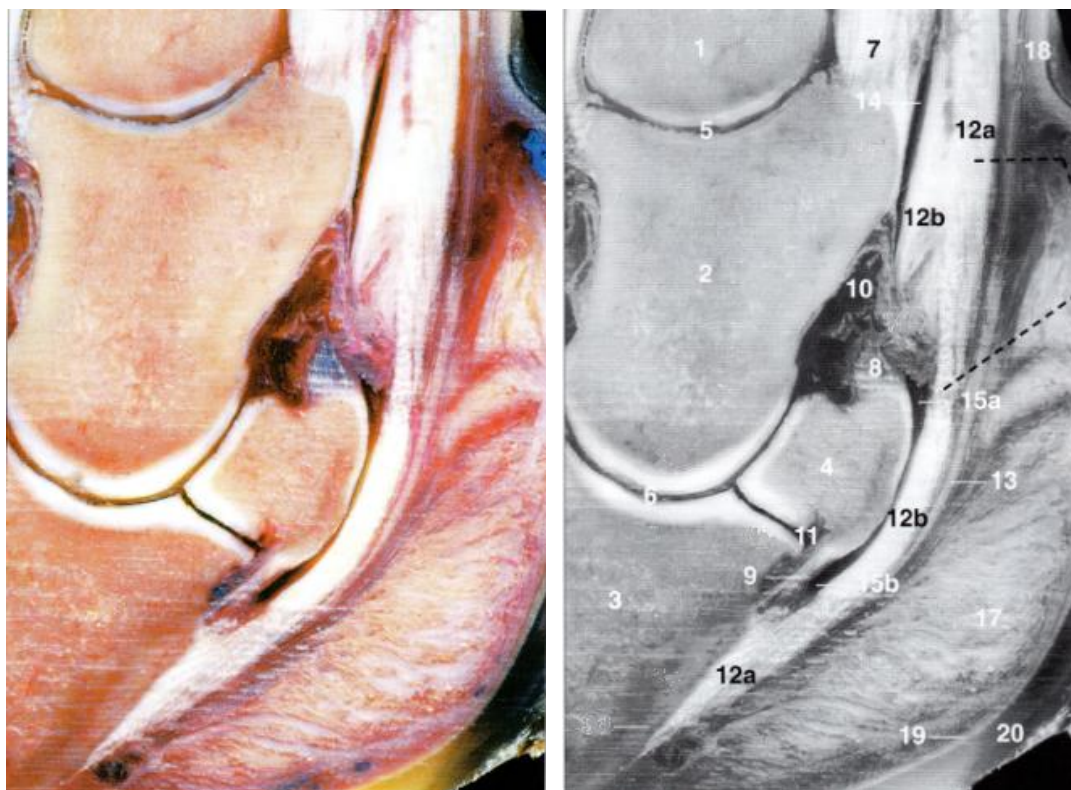


Figure 3 : Coupe sagittale de la région naviculaire (à gauche) et son schéma interprétatif (à droite) (d'après J.M Denoix, 2000)

- | | |
|--|---|
| 1 Phalange proximale | 12 Tendon fléchisseur profond du doigt |
| 2 Phalange moyenne | 12a Parties fibreuses |
| 3 Phalange distale | 12b Parties fibro-cartilagineuses |
| 4 Os naviculaire | 13 Ligament annulaire digital distal |
| 5 Articulation interphalangienne proximale (AIPP) | 14 Gaine digitale (Récessus distal dorsal) |
| 6 Articulation interphalangienne distale (AIPD) | 15 Bourse naviculaire |
| 7 Bourrelet glénoïdal | 15a Récessus proximal |
| 8 Ligament sésamoïdien collatéral | 15b Récessus distal |
| 9 Ligament sésamoïdien distal | 17 Coussinet digital |
| 10 Récessus palmaire proximal de l'AIPD | 18 Peau |
| 11 Récessus palmaire distal de l'AIPD | 19 Chorion de la fourchette |
| | 20 Fourchette |

- Les ligaments sésamoïdiens

Les ligaments sésamoïdiens collatéraux prennent leur origine depuis le bord de la phalange proximale (P1) correspondant (médial et latéral), où leur fibres les plus palmaires sont confondues avec le bord dorsal des ligaments collatéraux de l'articulation interphalangienne proximale (cf Figure 5). Ils se dirigent disto-palmairement, s'attachant le long de la surface abaxiale de la phalange moyenne (P2) pour s'insérer sur les extrémités du bord proximal de l'os sésamoïde distal . Leur rôle principal est de solidariser les deux articulations interphalangiennes : elles se fléchissent et s'étendent toujours en même temps. Ces ligaments s'opposent aux mouvement latéraux et rotatoires du naviculaire. L'échographie permet de les évaluer dans leur région sagittale et seulement dans leur partie proximale, leur partie distale étant masqué par la boîte cornée (cf Figure 4). L'examen IRM permet de les évaluer entièrement.

Le ligament distal impair (LSDI) relie le bord distal de l'os sésamoïde distal avec la surface rugueuse qui surmonte la crête semi-lunaire de la troisième phalange. A son insertion le LSDI contient un réseau important de micro-vaisseaux et de nerfs qui assurent une double fonction : à la fois d'assurer le bon fonctionnement d'un mécanisme de protection des structures adjacentes basé sur la détection des fortes modifications de pression durant le mouvement du pied, et de maintenir l'irrigation de ces tissus (Bowker, Ross and Dyson, 2010, chap. 29). Mécaniquement, le ligament s'oppose à l'extension exagérée de l'articulation IPD. L'échographie permet de l'évaluer dans sa région sagittale (Kidd et al., 2014).

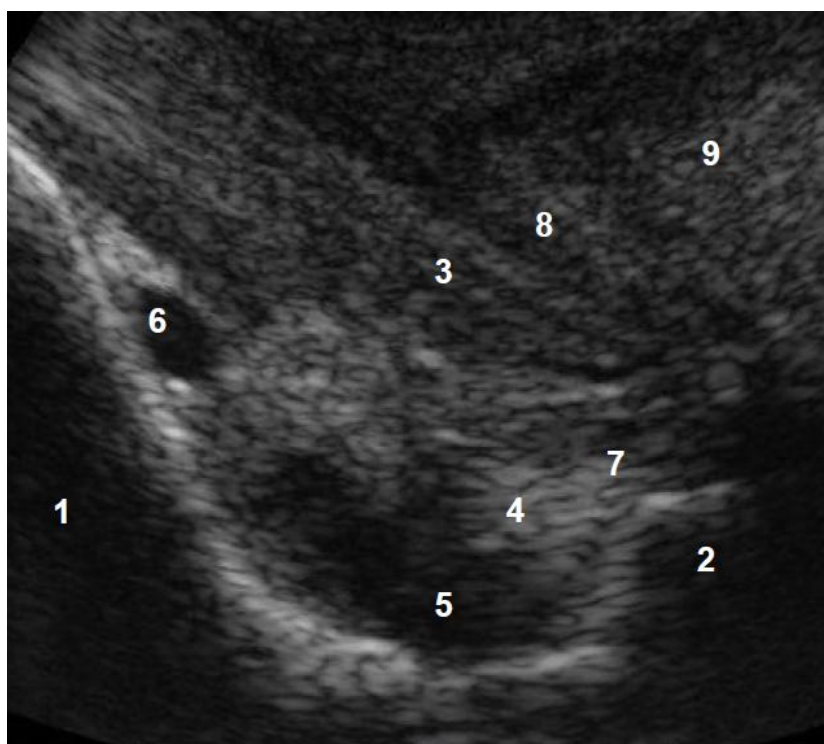


Figure 4 : Image échographique de la bourse naviculaire par abord proximo-palmar

(d'après Kidd, Lu, & Frazer, 2014)

- 1 Phalange moyenne
- 2 Os naviculaire
- 3 Tendon du muscle fléchisseur profond
- 4 Ligament sésamoïdien collatéral
- 5 Récessus proximo-palmar de l'articulation interphalangienne distale
- 6 Récessus de la gaine digitale
- 7 Bourse naviculaire
- 8 Ligament annulaire distal
- 9 Coussinet digital

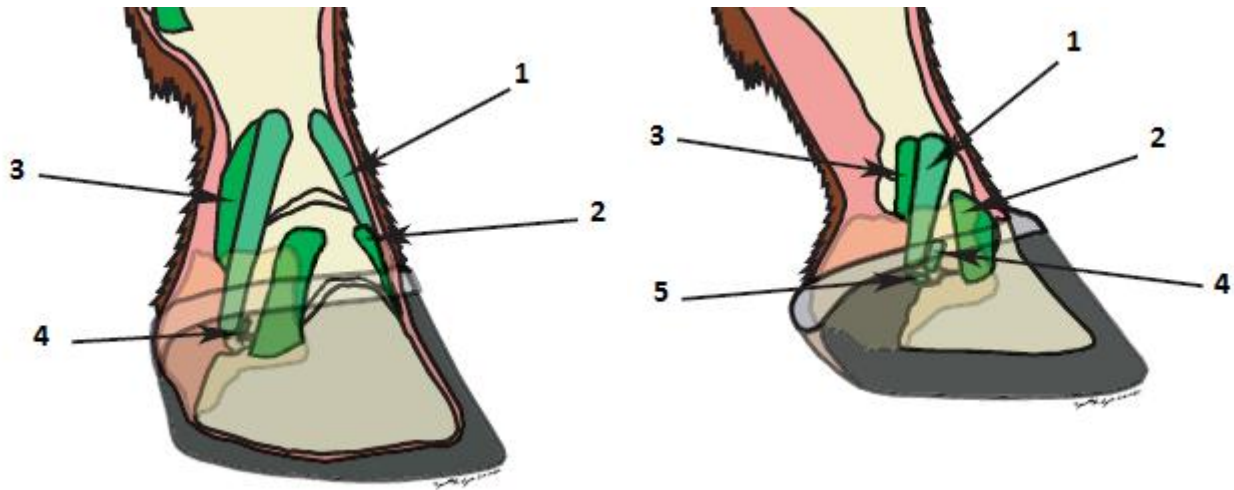


Figure 5 : Schéma des ligaments du pied en vue dorso-latérale (à gauche) et latéromédiale (à droite) (d'après Floyd & Mansmann, 2007)

- 1 Ligament sésamoïdien collatéral
- 2 Ligament collatéral de l'articulation interphalangienne distale
- 3 Ligament collatéral (latéral) de l'articulation interphalangienne proximale

- 4 Partie du ligament sésamoïdien collatéral s'attachant sur P2
- 5 Ligament chondronaviculaire

2. Structures complémentaires

a) Le coussinet digital

Il s'agit d'une structure pyramidale située dans la partie postérieure du pied. Le coussinet digital se moule sur la fourchette et s'écrase contre elle lors de l'appui, ce qui a pour conséquence d'écarter les cartilages unguulaires vers l'extérieur et ainsi de transmettre les efforts vers la périphérie. Il a donc un rôle d'amortisseur (Kainer, Stashak, 2002, chap. 1).

La composition du coussinet digital varie selon les individus : chez un cheval ayant des cartilages unguulaires fins, le coussinet sera composé majoritairement de tissu adipeux et de tissu conjonctif élastique alors que chez un cheval ayant des cartilages unguulaires épais, il sera majoritairement constitué de tissu conjonctif fibreux avec des îlots de fibrocartilage (Kainer, Stashak, 2002, chap. 1).

Il est très faiblement vascularisé mais très innervé : cela explique son rôle tactile et proprioceptif. Il intervient dans la sensibilité algique du pied.

b) Les cartilages unguulaires

Ces cartilages (un latéral et un médial) s'insèrent sur le processus palmaire de P3 et s'unissent aux phalanges par des tractus fibreux assimilables à des ligaments (cf Figure 6). Ils dépassent largement P3 palmairement et entrent en continuité avec les bulbes du coussinet digital. Ils sont palpables en face palmaire au dessus de la couronne.

Les cartilages unguulaires sont constitués de cartilage hyalin chez les jeunes et de fibrocartilage chez les adultes (Kainer, Stashak, 2002, chap. 1). Ils sont traversés dans leur

partie palmaire par des foramens permettant le passage des vaisseaux connectant le plexus veineux palmaire au plexus veineux coronaire.

Ils interviennent dans l'absorption des chocs lors de la locomotion et dans la vascularisation du pied. Lors de conditions de contraintes anormales ils peuvent développer des processus dégénératifs ou bien s'ossifier, ce qui entraîne leur perte d'élasticité et donc altère leur rôle dans la mécanique et la vascularisation du pied.

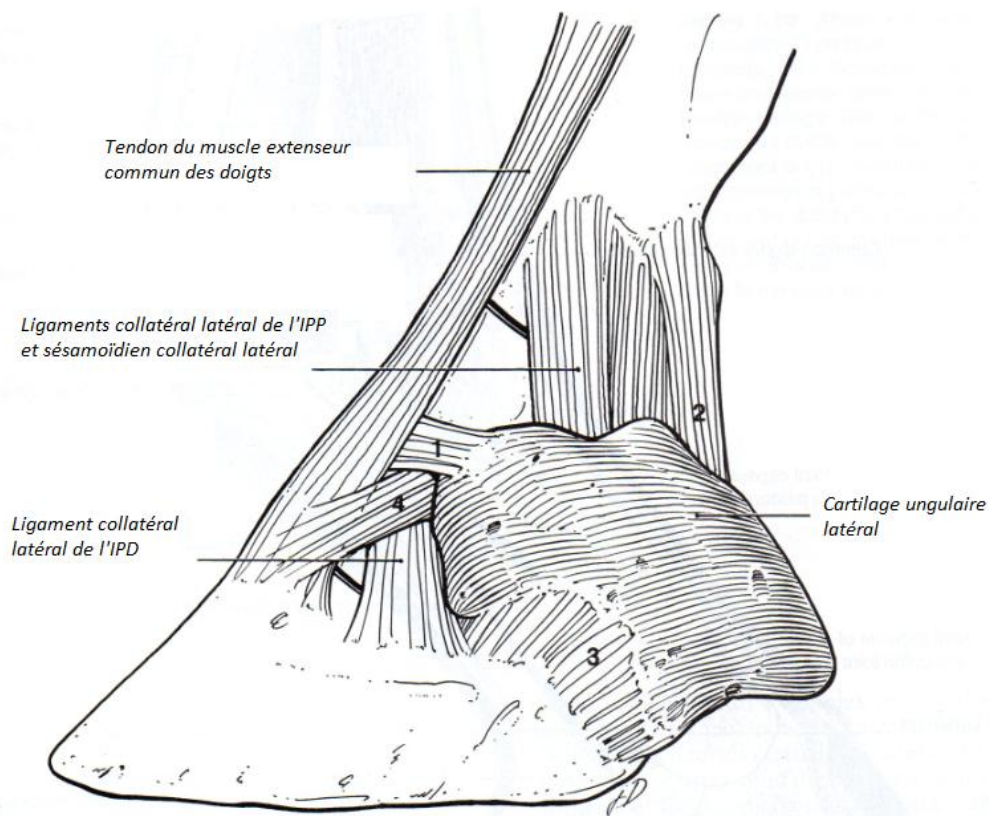


Figure 6 : Schéma des ligaments chondro-coronaux (1, 2, 3, 4) qui stabilisent le cartilage unguéaire (d'après Kainier, Stashak, 2002, chap. 1)

3. Vascularisation du Pied

a) L'Irrigation artérielle

La vascularisation du pied du membre thoracique dérive essentiellement de l'artère digitale commune palmaire II qui se divise en deux artères digitales propres, une médiale et une latérale, au niveau du quart distal du canon. Ces artères passent ensuite sur la surface abaxiale des os sésamoïdiens proximaux et longent le TFPD, puis passent sous les cartilages unguéaux pour rejoindre la face profonde du processus palmaire de la troisième phalange avant de s'engager dans le foramen solaire. Elles forment alors une arborisation terminale importante avec l'artère circonflexe de la sole. Ces anastomoses participent au système d'amortissement du sabot (Kainier, Stashak, 2002, chap. 1).

Tout au long de leur parcours, les artères digitales donnent naissance à des rameaux dorsaux et palmaires qui se rejoignent pour former des cercles artériels autour du pied sur chacune des phalanges (cf Figure 7). Au niveau du paturon, chaque artère digitale est encadrée dorsalement par sa veine satellite, et palmairement par le nerf digital propre palmaire (cf Figure 8).

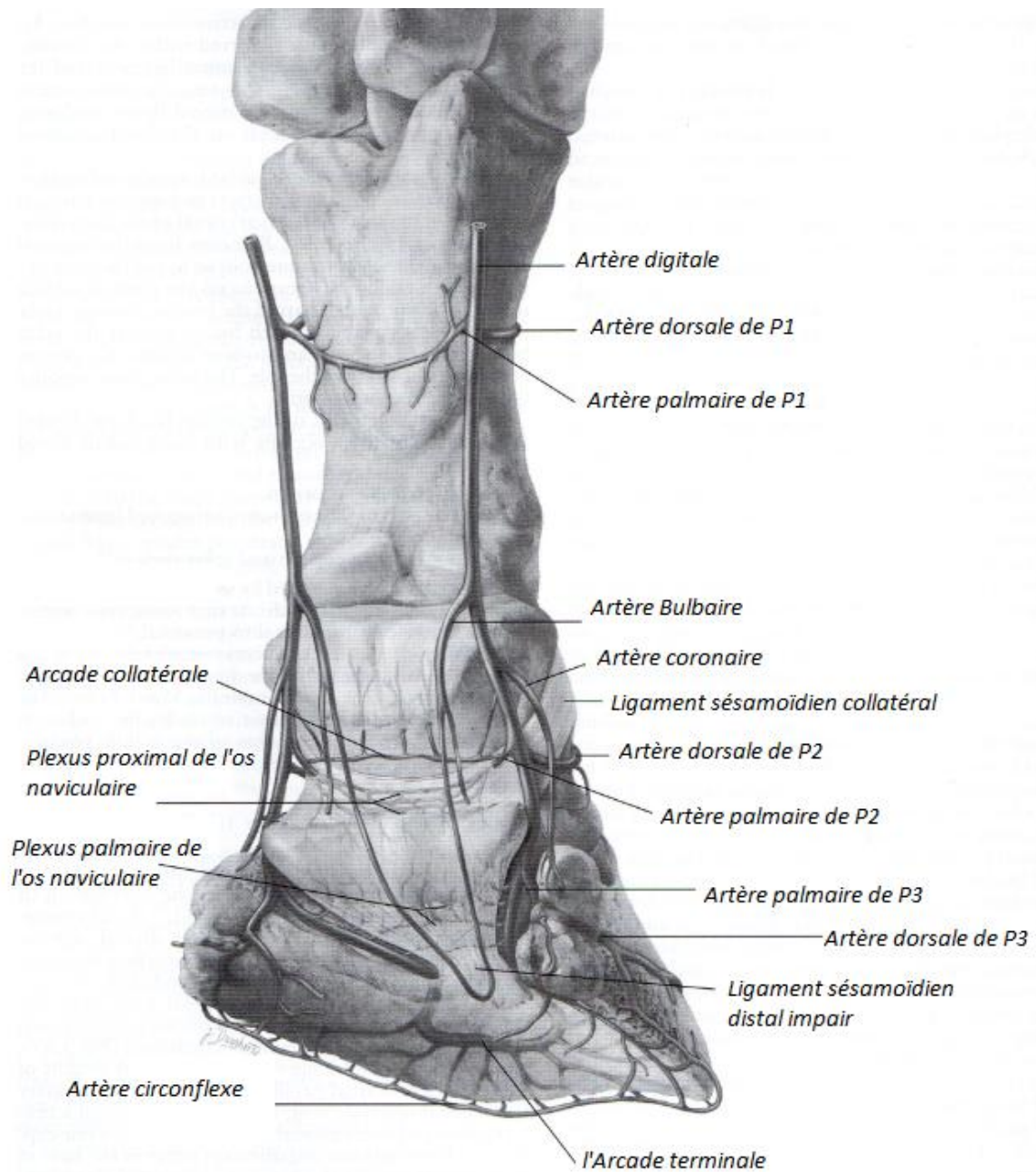


Figure 7 : Vue palmaire de la vascularisation du Pied

(d'après Kainer, Stashak, 2002, chap. 1, p16)

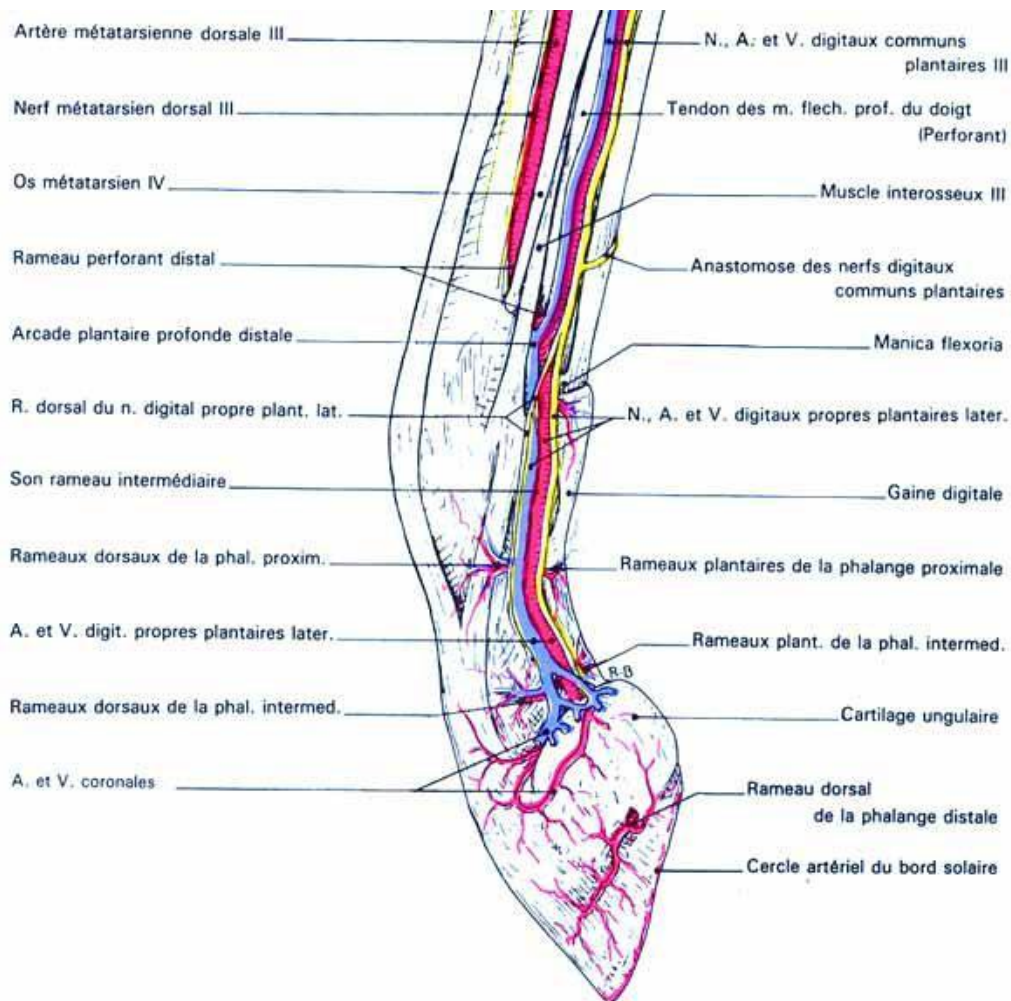


Figure 8 : Irrigation et innervation du membre distal du cheval.

On note la relation anatomique entre les nerfs, artères et veines digitaux palmaires/plantaires.

b) Le Drainage veineux

Il y a beaucoup plus de veines que d'artères dans le pied. En effet le réseau veineux du pied est formé de nombreuses ramifications formant un maillage très dense de vaisseaux. La circulation veineuse peut donc emprunter de multiples trajets (Vanschepdael, 2011). Ainsi le drainage veineux dans le pied est assuré par un réseau de trois plexus (cf Figure 9) :

- Le plexus pariétal (ou dorsal) : il se trouve dans la partie profonde du chorion pariétal. Il s'anastomose proximatement avec le plexus coronaire et distalement avec le plexus solaire.
- Le plexus solaire (ou palmaire/ plantaire) : il se trouve dans la partie profonde du chorion de la sole et en face axiale interne des cartilages unguulaires de P3 (Pollitt, 2010).

- Le plexus coronaire : il prend place dans le coussinet coronal, recouvrant le tendon extenseur du doigt et la face abaxiale externe des cartilages de P3. Il s'anastomose avec le plexus solaire via des foramens à travers les cartilages. Les deux faces des cartilages sont ainsi recouvertes de plexus veineux.

Les trois plexus sont drainés par les veines digitales latérales et médiales. Les veines profondes du pied ne comportent pas de valvules, alors que celles plus superficielles de la couronne et des talons en sont munies. L'absence de valvules favorise une évacuation rapide et dans toutes les directions possibles du sang contenu dans le pied, contribuant à répartir de manière uniforme la pression lors de la locomotion. La présence de valvules au niveau des veines caudales du sabot et des veines digitales propres empêche le sang de refouler vers le sabot et assure ainsi un retour veineux efficace vers le cœur (Pollitt, 2010).

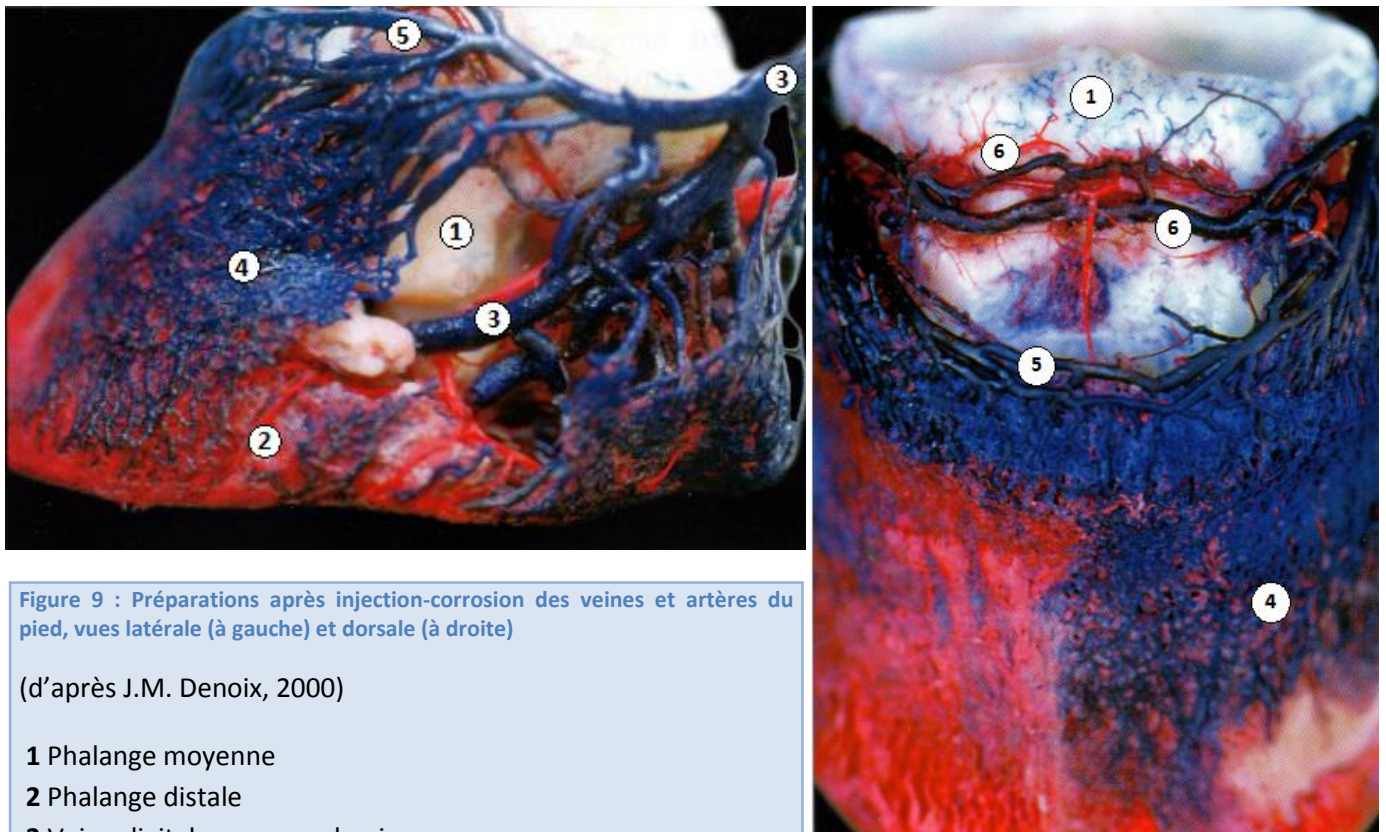


Figure 9 : Préparations après injection-corrosion des veines et artères du pied, vues latérale (à gauche) et dorsale (à droite)

(d'après J.M. Denoix, 2000)

- 1 Phalange moyenne
- 2 Phalange distale
- 3 Veine digitale propre palmaire
- 4 Plexus veineux pariétal
- 5 Veine coronaire
- 6 Rameau veineux dorsal de la phalange moyenne

c) *L'irrigation de l'os naviculaire*

L'irrigation de l'os naviculaire est assurée par deux principales sources : proximale et distale (Colles and Hickman, 1977).

- La source proximale provient de l'artère palmaire de P2, à partir de laquelle se forme un réseau d'anastomoses parallèle au bord proximal de l'os naviculaire et contenu dans les ligaments sésamoïdiens collatéraux (cf Figure 10 et Figure 11). Plusieurs artérioles partent de ce réseau et vont assurer l'irrigation du bord proximal de l'os naviculaire (Colles and Hickman, 1977).
- La source distale est issue d'une anastomose entre les artères digitales propres latérale et médiale, qui traverse le ligament sésamoïdien distal impair et donne naissance à plusieurs artérioles qui entrent dans l'os naviculaire au niveau de son bord distal (Hertsch and Dammer, 1988; Leach, 1993).

Ces deux réseaux se rejoignent ensuite au niveau du tiers proximal de l'os naviculaire : le réseau distal assure donc la majeure partie de l'irrigation de l'os naviculaire (Colles and Hickman, 1977; Hertsch and Dammer, 1988). Les vaisseaux distaux sont plus larges que les vaisseaux proximaux (Hertsch and Dammer, 1988).

Il existe une 3^{ème} source d'irrigation en plus des ramifications proximales et distales, qui provient des artères digitales propres latérale et médiale qui donnent naissance à des artères abaxiales pénétrant l'os naviculaire latéralement et médialement de manière isolée.

La partie centrale du bord proximal de l'os naviculaire contient des foramens qui permettent le passage des vaisseaux irriguant l'os. Le bord distal présente une surface articulaire avec la phalange distale, recouverte de cartilage hyalin, où se trouvent les foramens au travers desquels passent les vaisseaux distaux.

De nombreuses recherches ont été réalisées pour déterminer la nature de ces « foramens distaux » et le détail des modifications de taille de ces ouvertures dans l'os : selon Colles les branches de l'irrigation du bord distal de l'os naviculaire pénètrent petit à petit dans l'os et finissent par former vers l'âge de 2-3 ans des anastomoses en forme de cônes qui sont responsables par la suite de la formation de « foramens nutritifs » sur le bord distal de l'os (Colles and Hickman, 1977). Cependant Poulos démontre à l'histologie que ces « canaux » sont recouverts de membrane synoviale (Poulos and Smith, 1988) et Hertsch & Dammer mettent en évidence la relation entre ces « canaux sésamoïdiens » et l'articulation interphalangienne distale (Hertsch and Dammer, 1988). Il semblerait donc qu'il s'agisse de « fosses synoviales » en communication avec l'articulation interphalangienne distale, recouvertes de membrane synoviale. Pool montre à l'histologie que les vaisseaux distaux parcourent la paroi de ces fosses avant de rentrer dans l'os par un foramen nutritif à la base de la fosse (Figure 8) (Pool et al., 1989).

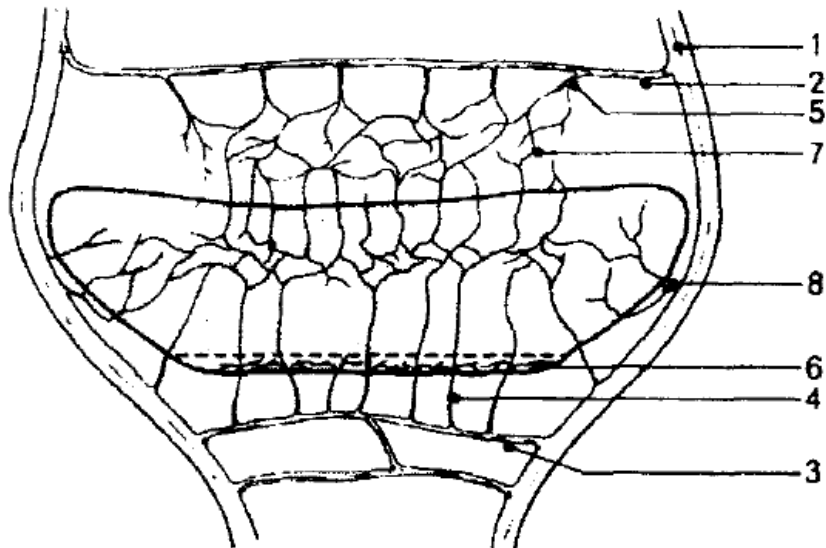


Figure 10 : Schéma de l'irrigation artérielle d'un os naviculaire sain (d'après Rijkenhuizen et al., 1989)

- | | |
|-----------------------------------|--|
| 1 Artère digitale propre palmaire | 5 Artériole proximale |
| 2 Artère palmaire de P2 | 6 Réseau d'anastomoses distal |
| 3 Rameau naviculaire distal | 7 Réseau d'anastomoses proximal |
| 4 artériole distale | 8 Artériole Abaxiale entrant dans l'os naviculaire |

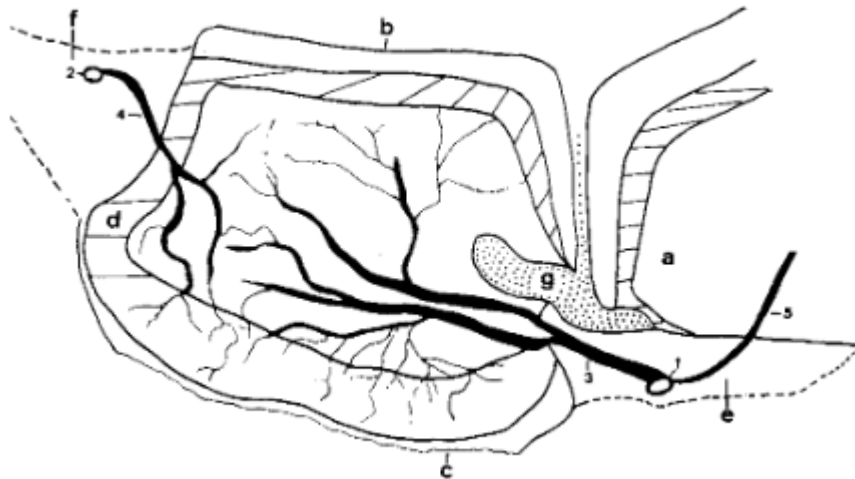


Figure 11 : Schéma de la vue latérale d'une section sagittale d'un os naviculaire sain (d'après Hertsch & Dammer, 1988)

- | | |
|--|---|
| (a) Phalange distale | 1 Section distale de l'anastomose entre les artères digitales médiale et latérale |
| (b) Cartilage de la surface articulaire | 2 Section proximale de l'anastomose entre les artères digitales médiale et latérale |
| (c) Cartilage de <i>facies flexoria</i> | 3 Artères distales de l'os naviculaire |
| (d) Sclérose | 4 Artères proximales de l'os naviculaire |
| (e) Ligament sésamoïdien distal impair | 5 Artères de la phalange distale |
| (f) Ligament sésamoïdien collatéral | |
| (g) Section d'une invagination synoviale | |

4. **Innervation**

a) Origine des nerfs

Les nerfs du pied du membre thoracique proviennent du nerf ulnaire et du nerf médian. Le nerf médian donne naissance au nerf digital palmaire commun II, qui devient le nerf digital propre palmaire médial, et fournit un rameau pour le nerf digital palmaire commun III. Le nerf ulnaire fusionne avec le rameau provenant du nerf médian pour former le nerf digital palmaire commun III. Celui-ci devient ensuite le nerf digital propre palmaire latéral. Ils descendent tout deux le long de la face palmaire de l'artère correspondante et donnent de nombreux rameaux palmaires et dorsaux au niveau du boulet.

b) Rôle des nerfs

L'innervation du pied est cruciale pour le cheval car elle conditionne son interaction avec l'environnement. Le pied est un organe qui relaie des informations de toucher, de pression, de proprioception et douleur. Ces nerfs ont donc un rôle majoritairement sensitif étant donné qu'il n'y a pas de muscles dans la région distale du membre.

Les nerfs digitaux palmaires sont constitués à la fois de fibres myélinisées et non myélinisées. La plupart de l'information sensorielle, notamment la nociception, est transmise via les fibres non myélinisées qui sont les plus lentes. De plus certaines fibres sont efférentes et libèrent des neuropeptides donc le rôle dépend des molécules émises mais semble avoir une relation étroite avec les vaisseaux (vasodilatation ou vasoconstriction) (Bowker et al., 1995). Leur activation, par des mécanismes physiologiques ou pathologiques comme la douleur, entraîne l'augmentation de la concentration de ces peptides dans les tissus constitutifs du pied et leur interaction avec les molécules de l'inflammation (Bowker et al., 1995). Les sensations de toucher et de proprioception sont quant à elles transmises via les fibres myélinisées.

L'ensemble de ces fibres permet au cheval de s'adapter aux reliefs du terrain au cours de la locomotion et constitue un système de « surveillance » des structures du pied en contrôlant son univers physiologique et pathologique (Bowker, Ross and Dyson, 2010, chap. 29). Les fibres étant majoritairement palmaires, un poser en pince a tendance à moins stimuler les nerfs sensitifs.

II. Etiologie de la Maladie Naviculaire

A. Epidémiologie

1. Âge et sexe

La maladie naviculaire semble avoir une incidence plus importante chez les chevaux d'âges moyens : de 4 à 15 ans selon Stashak (Stashak, 2002), de 6 à 10 ans selon Rose (Rose, 1996), de 6 à 12 ans selon Mac Gregor (MacGregor, 1989). Il s'agit en réalité de la période correspondant au maximum d'activité des chevaux de travail.

Des études ont mis en évidence la prédominance de mâles castrés atteints de maladie naviculaire (Rose, 1978) mais il semble que cela reflète la proportion de chevaux hongres dans les disciplines sportives mises en cause lors de maladie naviculaire (Wright, 1993a). Une telle prédominance n'a d'ailleurs pas été mise en évidence dans d'autres études (Colles, 1982; MacGregor, 1984).

2. Travail et races

Selon certains auteurs le Quarter Horse, qui a des pieds plutôt droits jointés, étroits et petits comparés à la forte musculature de son corps, est une race très affectée par le syndrome naviculaire (Dyson et al., 2011; Rose, 1978; Stashak, 2002). La maladie naviculaire est au contraire rare chez les Arabes ou chez les races lourdes et les chevaux de traits (MacGregor, 1984; Stashak, 2002).

Une prévalence plus élevée chez le Pur-Sang (Thoroughbred) a également été démontrée par Colles et Mac Gregor (Colles, 1982; MacGregor, 1984) sans relation avec une discipline sportive particulière. Il semblerait qu'il y ait donc une composante génétique qui intervienne dans cette prévalence particulière du Pur-Sang. C'est sans doute à mettre en relation avec le fait que les Pur-Sang ont souvent des pieds plats avec des talons bas et fuyants.

La maladie naviculaire se retrouve d'autant plus chez les chevaux fournissant un travail irrégulier, saisonnier et sur un sol dur (Colles, 1982; MacGregor, 1989). De plus un travail nécessitant des arrêts rapides ou des changements brusques de direction, comme dans l'équitation Western ou lors de sauts, prédispose à un stress plus important exercé sur l'os naviculaire et les structures adjacentes (Ratzlaff and White, 1989).

3. Conformation du pied

La conformation du pied semble avoir une part très importante dans la pathologie de la maladie naviculaire. Un déséquilibre marqué du sabot et une conformation inadaptée sévère résultent en l'application de forces biomécaniques anormales sur l'os naviculaire et les structures adjacentes.

Ainsi chez un cheval long et bas jointé, ayant une pince longue, le centre de pression (point d'application de la résultante des forces s'appliquant sur le pied) est déporté vers l'avant de la pointe de la fourchette, redressant le boulet et le paturon. Cette conformation

concentre un stress plus important sur les structures naviculaires et la phalange distale tout en augmentant la tension s'exerçant sur le tendon fléchisseur profond du doigt. En effet elle provoque une hyper-extension de l'articulation interphalangienne distale et met donc plus de tension sur le TFPD. De plus en raison de la pince longue et de l'angle aigu de la paroi dorsale du sabot par rapport au sol, la bascule du pied lors de chaque foulée est plus difficile et augmente l'effort musculaire nécessaire pour le soulèvement des membres : la compression de l'os naviculaire par le TFPD est alors potentialisée. Enfin dans la configuration en pince longue et talons bas, le contact avec le sol se fera en premier avec la pince, aggravant les commotions infligées au pied par une diminution de la dissipation de l'impact. (Colles, 1982; Eliashar et al., 2004; Pool et al., 1989; Wright, 1993a)

A l'opposé, un membre droit jointé sera un mauvais amortisseur de chocs. En effet cette conformation relâche le TFPD mais augmente la commotion exercée sur l'os naviculaire et les structures associées : le centre des pressions est déplacé vers l'arrière de l'apex de la fourchette et on a donc une augmentation des vibrations et des chocs au niveau de l'appareil podotrochléaire (Stashak, 2002).

Les ferrures inadaptées ou les excès de poids sont également des facteurs aggravants. Ces considérations biomécaniques seront mieux développées dans la deuxième partie de cette étude.

B. Mécanismes physiopathologiques

Même si la prévalence de la maladie naviculaire est estimée à un tiers des boiteries chronique des antérieurs (Colles, 1982), son étiologie exacte demeure encore un mystère et reste un sujet à controverse. Plusieurs théories ont animé le débat de la pathogénie du syndrome podotrochléaire : l'une vasculaire selon laquelle des modifications de l'irrigation de l'os naviculaire déclencheraient les processus pathologiques, et l'autre biomécanique qui met en jeu les forces s'exerçant sur l'appareil podotrochléaire.

1. Mécanismes vasculaires

Dans une étude, Colles & Hickman ont découvert que la maladie naviculaire s'accompagne de modifications de la vascularisation distale de l'os naviculaire : on observe une dilatation des vaisseaux irrigants l'os sésamoïdien distal et qu'au moins deux vaisseaux du bord distal sont occlus de manière totale ou partielle par un phénomène de thrombose. De plus, ils ont remarqué que le nombre d'anastomoses dans l'os entre les vaisseaux augmente. Ils ont conclu que la maladie naviculaire serait consécutive à une thrombose des vaisseaux distaux, qui crée une ischémie locale ainsi qu'une augmentation de la vascularisation proximale par compensation. Celle-ci finirait par ne plus être efficace entraînant alors la nécrose et les lésions du cortex palmaire de l'os observables lors de maladie naviculaire. L'ischémie serait également à l'origine de la douleur. La résorption du

tissu nécrotique provoque la lyse de l'os sous-chondral et la formation de kystes dans l'os (Colles and Hickman, 1977).

Une autre étude met en cause la sclérose des artères distales dans le mécanisme pathologique de la maladie naviculaire (Rijkenhuizen et al., 1989). Les auteurs ont eux aussi mis en évidence l'augmentation de l'apport vasculaire proximal en compensation de la diminution de l'apport distal. L'ischémie ainsi que l'augmentation de la pression artérielle et intra-osseuse seraient à l'origine des changements de forme et de nombre des fossettes synoviales par lesquelles les artères entrent distalement dans l'os. Pour eux, les lésions du TFPD seraient consécutives à celles de l'os naviculaire faisant suite à l'artériosclérose distale.

Cependant aucune équipe de recherche ne fut en mesure de reproduire les signes cliniques de la maladie naviculaire en réalisant l'occlusion des vaisseaux sanguins irriguant l'os sésamoïdien distal. De plus ces études n'ont pas mis en évidence de thrombose ou d'ischémie osseuse, ce qui a conduit à la remise en question puis à l'abandon des théories vasculaires (Hertsch and Dammer, 1988; Østblom et al., 1982; Pool et al., 1989; Svalastoga, 1983; Wright et al., 1998).

Selon Hertsch & Dammer, la diminution de la vascularisation distale est due à la compression des vaisseaux distaux par l'expansion des canaux sésamoïdiens qui permettent aux artères de pénétrer dans l'os. La douleur résulte de l'hyperhémie (par augmentation de la vascularisation proximale) et du remodelage osseux qui entraînent la compression des nerfs. Cependant ce mécanisme vasculaire ne serait pas suffisant à lui seul pour expliquer la pathogénie de la maladie naviculaire selon les auteurs (Hertsch and Dammer, 1988).

Plusieurs auteurs s'accordent sur le fait qu'il y a bien une modification de la vascularisation de l'os sésamoïdien distal lors de maladie naviculaire mais qu'elle serait plus une conséquence qu'une cause et notamment une conséquence de l'augmentation de l'activité osseuse (Østblom et al., 1982; Pool et al., 1989) : ils observent une hyperhémie. Ces considérations nous amènent à discuter de la théorie biomécanique dans l'étiologie du syndrome podotrochléaire.

La Figure 12 permet de schématiser l'élargissement des invaginations synoviales fréquemment rencontré lors de maladie naviculaire. On observe bien la compression de la vascularisation distale par l'expansion des fosses synoviales, opposée à la dilatation de la vascularisation proximale, provoquant une hyperhémie à l'intérieur de l'os. Au contraire, au niveau des lésions du cortex fléchisseur l'irrigation est semblable à celle d'un os naviculaire sain mais une néo-vascularisation se met en place au niveau des lésions « pseudo-kystiques ».

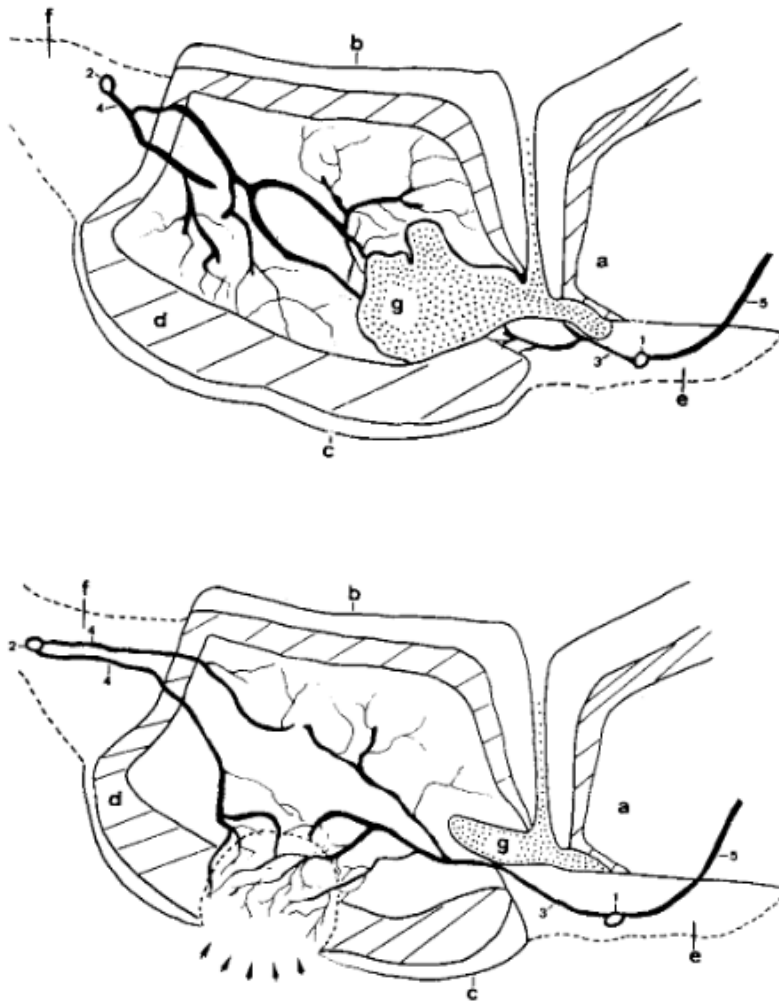


Figure 12 : Schéma de la vue latérale d'une section sagittale d'un os naviculaire

Le schéma représente un os naviculaire ayant des invaginations synoviales modifiées (en haut) et d'un autre ayant une érosion profonde du cortex palmaire atteignant la cavité médullaire

(d'après Hertsch & Dammer, 1988)

- (a) Phalange distale
- (b) Cartilage de la surface articulaire
- (c) Cartilage de *facies flexoria*
- (d) Sclérose
- (e) Ligament sésamoïdien distal impair
- (f) Ligament sésamoïdien collatéral
- (g) Section d'une invagination synoviale

- 1 Section distale de l'anastomose entre les artères digitales médiale et latérale
- 2 Section proximale de l'anastomose entre les artères digitales médiale et latérale
- 3 Artères distales de l'os naviculaire
- 4 Artères proximales de l'os naviculaire
- 5 Artères de la phalange distale

2. Mécanismes biomécaniques

La première théorie biomécanique est proposée par Adams qui explique que la maladie naviculaire tient son origine d'une bursite podotrochléaire causée par la pression répétée de l'os naviculaire contre le TFPD, notamment lors de mauvaise conformation comme les pâtureurs droit-jointé, ou lors de travail irrégulier sur sol dur, avec une ferrure inappropriée (Pool et al., 1989). Cependant une étude plus récente se basant sur l'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM) montre que la plupart des chevaux naviculaires n'ont pas de bursite associée, par conséquent elle ne semble pas être la cause primaire (Schneider et al., 2003).

Plusieurs études s'accordent sur le fait qu'il y a bien des modifications vasculaires lors de maladie naviculaire mais que celles-ci sont secondaires à l'augmentation du remaniement osseux suite à des contraintes biomécaniques anormales s'appliquant sur l'os naviculaire (Østblom et al., 1982; Pool et al., 1989; Svalastoga, 1983). En effet une mauvaise conformation est à l'origine d'un traumatisme mécanique répété s'exerçant sur l'os

sésamoïdien distal et ses structures adjacentes et provoque alors une résorption osseuse : l'os essaye de répondre aux contraintes en se remodelant de manière à atténuer les forces qui le compriment (Pool et al., 1989). On observe ainsi une hyperhémie, consécutive à l'augmentation du remaniement osseux.

Pour Ostblom et al, ces forces anormales causant une augmentation de l'activité osseuse correspondent à l'augmentation de la pression exercée par le TFPD sur l'os sésamoïdien distal (Østblom et al., 1982). De même Denoix montre qu'une conformation de pâturons longs et bas jointés, associée à une pince longue, va induire une extension de l'AIPD et donc une augmentation de la pression concentrée sur la face palmaire de l'os naviculaire (Denoix, 1999a). Cette théorie est confirmée par les travaux d'Eliashar qui démontre que pour une diminution de 1° de l'angle solaire de P3 (ce qui correspond à des talons plus bas), on observe une augmentation de 20% de la force exercée par le TFPD sur l'os naviculaire au début de la phase d'appui (Eliashar et al., 2004). Ainsi une mauvaise conformation tend à modifier les valeurs des forces s'exerçant sur les structures du pied et entraîne des changements dans la physiologie de l'os naviculaire : toutes les modifications de conformations entraînant la diminution de l'angle du TFPD au niveau de ses points d'appuis sur l'os naviculaire sont responsables de l'augmentation de la force qu'il exerce sur l'os en ces points (Pool et al., 1989).

Plusieurs auteurs ont fait le parallèle entre la pathogénie de la maladie naviculaire et celle des arthropathies dégénératives, notamment des articulations interphalangiennes (Pool et al., 1989; Svalastoga and Smith, 1983; Wright et al., 1998). Svalastoga & Smith constatent une augmentation de la pression intra-médullaire dans l'os naviculaire entraînant à son tour une baisse de la différence de pression artérioveineuse. Ceci provoque une diminution du flux sanguin ainsi qu'une stase veineuse : la nutrition des cellules osseuses s'en trouve altérée, ce qui est à l'origine des lésions de dégénérescence de l'os observées lors de maladie naviculaire. Cette théorie écarte donc les hypothèses de thrombose et d'artériosclérose qui sont responsables, au contraire, d'une diminution de la pression intra-osseuse. La douleur provient selon eux de l'augmentation de cette pression intra-osseuse. Ainsi, lors de maladie naviculaire on observe une hyperhémie artérielle, notamment au niveau du *facies flexoria*, associée à une stase veineuse (Stashak, 2002; Svalastoga, 1983) et ces modifications vasculaires sont responsables des signes cliniques.

Ces observations se rapprochent beaucoup des changements observés lors des phénomènes de dégénérescence des articulations comme l'arthrose.

Des études récentes se sont intéressées aux structures adjacentes à l'os sésamoïdien distal, à savoir les ligaments sésamoïdiens collatéraux (LSCs), le ligament sésamoïdien distal impair (LSDI), la bourse naviculaire, l'articulation interphalangienne distale (AIPD) et la partie distale du tendon fléchisseur profond du doigt (Blunden et al., 2006a, 2006b; Bowker, 2003). Il semble que les lésions de ces structures aient un lien avec la pathogénie du syndrome naviculaire. En effet, les régions d'insertion du LSDI et du TFPD ainsi que celles des LSCs sont

des zones qui contiennent beaucoup de vaisseaux et de nerfs allant respectivement irriguer ou innervent l'os naviculaire. Ces régions fonctionnent donc comme des « goulots » qui lorsqu'elles sont atteintes peuvent altérer l'homéostasie de l'os naviculaire et des structures associées (Bowker, 2003). Or l'inflammation de ces régions provient d'une mauvaise conformation ou bien d'une mauvaise biomécanique du pied : si la tension dans les LSCs ou bien dans le LSDI augmente, on aura une compression des vaisseaux qu'ils contiennent, pouvant expliquer les changements vasculaires visibles lors du syndrome naviculaire (Bowker, 2003; Ratzlaff and White, 1989).

Nous allons maintenant étudier les lésions observées lors de maladie naviculaire.

III. Lésions de l'os naviculaire et des structures associées

A. La face palmaire de l'os naviculaire

1. Atteinte du fibrocartilage de la *facies flexoria*

Le fibrocartilage de la *facies flexoria* de l'os naviculaire présente souvent une coloration jaune-brunâtre associée à des érosions locales totales ou partielles (Blunden et al., 2006a; Doige and Hoffer, 1983; Pool et al., 1989; Wright et al., 1998). Ces lésions se retrouvent à la fois chez les chevaux âgés et chez les chevaux atteints de maladie naviculaire, cependant elles semblent être plus sévères lors de syndrome naviculaire et vont être associées à des atteintes du cortex et de la cavité médullaire (Pool et al., 1989; Wright et al., 1998).

La dégénérescence du cartilage se retrouve principalement centrée ou en dessous de la ligne proximo-distale de la face palmaire de l'os, qui correspond à une zone subissant de fortes pressions du fait de la convexité plus importante du tiers inférieur de l'os (Blunden et al., 2006a; Pool et al., 1989; Wright et al., 1998).

Pool et Wright mettent également en évidence l'existence d'une fossette synoviale située sur le tiers intermédiaire de la *facies flexoria*, centrée sur le relief sagittal (Pool et al., 1989; Wright et al., 1998). Cette zone subit moins de pression et donc selon Pool les chondrocytes sont moins stimulés, par conséquent le renouvellement du cartilage est moindre. Si cette lésion n'est pas pathologique, elle est en revanche un lieu privilégié pour la formation de tissu de granulation et donc pour la création d'adhérences avec le TFPD lors de maladie naviculaire (Pool et al., 1989; Wright et al., 1998).

L'atteinte du fibrocartilage semble représenter le stade précoce de la maladie naviculaire mais elle reste difficile à évaluer, même à l'IRM (Schramme et al., 2005; Sherlock et al., 2008).

2. Erosion du cortex palmaire et lyse de la moelle

La progression de la perte locale de fibrocartilage peut s'étendre au cortex palmaire puis à la cavité médullaire : les vaisseaux du processus inflammatoire pénètrent la paroi des érosions dans le fibrocartilage et donnent naissance au tissu de granulation qui se propage dans l'os sous-chondral. Les érosions du cortex palmaire sont partielles ou totales et sont toujours liées à une dégénérescence importante du fibrocartilage de l'os et du TFPD en regard des lésions. La plupart se retrouvent donc sur le tiers distal de l'os naviculaire (Doige and Hoffer, 1983; Pool et al., 1989; Wright et al., 1998).

Ces lésions du cortex palmaire sont souvent accompagnées d'œdème, de congestion et de fibrose du tissu réticulé (espaces entre les alvéoles) de l'os spongieux qui résultent en la formation de lésions pseudo-kystiques (Blunden et al., 2006a; Dyson et al., 2011; Wright et al., 1998). Il s'agit d'un des deux types de pseudo-kystes décrits par Poulos dans la maladie naviculaire : d'une part sur le bord distal de l'os et d'autre part sur sa face palmaire (Poulos and Smith, 1988). La pathologie de ces deux types de pseudo-kystes est différente, comme en témoigne leur absence de fusion sur le bord distal ou la face palmaire (Pool et al., 1989; Poulos and Smith, 1988; Wright et al., 1998)

B. Le bord distal de l'os naviculaire

Consécutivement aux lésions dégénératives de la face palmaire de l'os, d'autres atteintes de l'os se développent sur son bord distal : il s'agit de pseudo-kystes correspondant à un élargissement des invaginations synoviales par lesquelles les vaisseaux pénètrent le bord distal de l'os naviculaire. Ces lésions résultent du recrutement et de l'activation d'ostéoclastes apportés par la vascularisation modifiée en réponse à l'augmentation de résorption osseuse (Dyson et al., 2011; Pool et al., 1989; Wright et al., 1998). En effet on observe une hyperhémie de l'os sésamoïdien distal chez les chevaux naviculaires (Østblom et al., 1982; Pool et al., 1989; Svalastoga and Smith, 1983). Cependant pour Blunden, il est difficile de savoir si ces pseudo-kystes résultent de l'élargissement des invaginations synoviales et/ou de la coalescence de plusieurs zones de lyse médullaire (Blunden et al., 2006a).

Ces lésions du bord distal se retrouvent également dans une moindre mesure sur le bord proximal (Blunden et al., 2006a).

C. Les structures associées

1. Lésions du tendon fléchisseur profond du doigt (TFPD)

Des lésions de fibrillation de la face dorsale du TFPD se retrouvent à la fois chez les chevaux sains et chez les chevaux atteints de syndrome naviculaire. Cependant les lésions plus sévères, à savoir une modification d'architecture avec une fibrose locale, une métaplasie fibro-cartilagineuse, et une occlusion des vaisseaux, sont observées seulement chez les chevaux naviculaires. Ces atteintes semblent prédisposer à des fissures de la face

dorsale du TFPD car elles sont situées majoritairement dans le septum intratendineux. Les fissures du tendon peuvent causer des ulcérations du fibrocartilage de l'os naviculaire et donc aggraver les lésions déjà présentes (Blunden et al., 2006b). De plus, on observe souvent des adhésions entre le TFPD et l'os naviculaire au niveau de ses fissures, ainsi que des pertes d'épaisseur du fibrocartilage de l'os, avec ou sans érosion du cortex palmaire (Wright et al., 1998).

Il est cependant difficile de savoir quelle est la chronologie d'apparition des lésions de l'os et du TFPD (Blunden et al., 2006b; Sherlock et al., 2008).

2. Formation d'enthésophytes

On observe parfois la formation d'enthésophytes au niveau du bord proximal de l'os naviculaire, correspondant à l'insertion distale des ligaments sésamoïdiens collatéraux (LSCs). Cependant l'interprétation clinique est incertaine, cette lésion se retrouvant également chez les chevaux sains (Blunden et al., 2006a; Doige and Hoffer, 1983; Wright et al., 1998). Une plus forte prévalence d'enthésophytes lors de syndrome naviculaire semble toutefois supporter la théorie que ces lésions accélèrent l'expression clinique de la maladie (Wright et al., 1998).

On observe également de manière plus fréquente des enthésophytes au niveau de l'insertion du ligament sésamoïdien distal impair (LSDI) avec une incidence significativement plus marquée chez les chevaux souffrant de maladie naviculaire par rapport aux chevaux sains (Blunden et al., 2006a; Dyson et al., 2011; Wright et al., 1998). Bowker démontre que les lésions dans la région d'insertion du LSDI et du TFPD reflètent l'application de forces anormales dues à des défauts de conformation (Bowker, 2003).

Ces lésions sont associées à un remodelage de l'os au niveau des insertions des ligaments, indiquant leur intervention dans la pathologie du syndrome naviculaire (Dyson et al., 2011). Elles se trouvent en effet au niveau de passage d'artères, de veines et de nerfs pouvant alors intervenir dans la pathogénie de la maladie naviculaire (Bowker et al., 2001).

3. Bourse naviculaire et Articulation interphalangienne distale

Bien qu'historiquement associées à la pathogénie du syndrome naviculaire, l'incidence et la relation de la bursite avec le développement de la maladie ont été remises en cause. Les études récentes montrent que la synovite n'est pas une lésion systématique même si sa présence semble être liée aux atteintes du bord dorsal du TFPD et de la face palmaire de l'os (Blunden et al., 2006a; Schneider et al., 2003).

La synovite de l'articulation interphalangienne distale (AIPD) quant à elle, semble être plutôt une lésion de dégénérescence de l'articulation liée à l'âge et au travail (Blunden et al., 2006a; Wright et al., 1998).

D. Conclusion

Le processus pathologique qui atteint les structures du pied lors de maladie naviculaire semble être proche d'un processus dégénératif, similaire à celui observé dans les articulations, qui est accéléré (Pool et al., 1989; Sherlock et al., 2008; Wright et al., 1998). L'atteinte primaire semble se situer au niveau du fibrocartilage de l'os naviculaire et du TFPD. Or le fonctionnement normal du cartilage demande une organisation précise de l'activité anabolique et catabolique des chondrocytes : une perturbation de l'homéostasie va conduire en l'apparition de lésions de dégénérescences.

Durant le mouvement, le TFPD comprime l'os naviculaire, et notamment sa partie palmaire distale lors de la phase de propulsion (Bowker et al., 2001; Denoix, 1999a). Si la pression du TFPD augmente, l'homéostasie du cartilage est perturbée et conduit à la dégénérescence de l'os et des structures associées. Les forces physiologiques ou non physiologiques légères consécutives à de faibles défauts de conformation, vont induire un épaissement du cortex et des érosions peu étendues du fibrocartilage. Les forces non physiologiques sévères, dues à des défauts de conformation importants, sont responsables des lésions dégénératives de la maladie naviculaire : érosions marquées du fibrocartilage et du cortex, sclérose de l'os sous-chondral, épaissement des alvéoles, lyse focale, œdème, congestion et fibrose de la moelle. Cette augmentation de l'activité osseuse est consécutive à une hyperhémie.

La pathogénie du syndrome naviculaire ne comprend cependant pas seulement l'os naviculaire mais aussi les structures associées : LSCs, LSDI, partie distale du TFPD, bourse naviculaire (Blunden et al., 2006a, 2006b; Denoix, 2002a). Chacune ou plusieurs de ses lésions peuvent être atteintes. Ainsi selon les structures anatomiques préférentiellement atteintes, on distingue sept types de syndrome naviculaire :

- Articulaires : distension des invaginations synoviales distales de l'os naviculaire, bursite et synovite de l'AIPP.
- Tendineuse : Atteinte de la face palmaire de l'os et de la face dorsale du TFPD en regard de l'os.
- Ligamentaire : Desmopathie et/ou enthésopathie des ligaments sésamoïdiens collatéraux ou distal impair.
- Sclérosante : Sclérose de la partie spongieuse de l'os naviculaire
- Forme lytique ou kystique : zone ostéolytique au niveau de l'os spongieux et cortical
- Forme composite : Associations de plusieurs formes précédemment énoncées.
- Fractures de l'os sésamoïde distal : non étudiées ici

IV. Signes cliniques du Syndrome Podotrochléaire

A. Anamnèse

L'anamnèse est le point de départ de toute démarche diagnostique car elle permet d'obtenir une première orientation sur l'origine de la boiterie.

La maladie naviculaire se présente comme étant une boiterie d'apparition généralement insidieuse, intermittente au début puis permanente par la suite, parfois unilatérale mais le plus souvent bilatérale (Denoix, 2002a; Leach, 1993; MacGregor, 1989; Rose, 1996).

L'apparition de la boiterie est généralement progressive, chronique, évoluant depuis plusieurs mois voire plusieurs années. Le caractère chronique permet d'éliminer les affections d'apparition aiguës telles que les abcès de pied, les fractures de la troisième phalange ou de l'os naviculaire, et les affections traumatiques des tissus mous (ligaments, tendons). On peut cependant avoir une boiterie aiguë modérée (Dyson et al., 2011; Sherlock et al., 2008) et cela démontre que la maladie a sûrement une évolution sub-clinique avant de devenir clinique. Une boiterie bilatérale peut également masquer l'atteinte d'un membre : en effet si dans son étude Wright trouve que 78% des chevaux de l'étude présentent une atteinte bilatérale, il remarque que la sévérité est rarement la même sur les deux membres. Il y a souvent un pied qui présente une atteinte plus marquée que son controlatéral (Wright, 1993a).

La boiterie concerne majoritairement les antérieurs, même si parfois une atteinte des postérieurs a été mise en évidence (Dyson et al., 2011). Ceci peut-être attribué au fait qu'au repos 60% du poids du corps est porté par les antérieurs et qu'en mouvement les antérieurs subissent de fortes pressions au niveau du pied, notamment lors de réception de saut ou de changements brusques de direction (Ratzlaff and White, 1989).

Le propriétaire peut également rapporter que le cheval n'engage pas ses antérieurs, qu'ils semblent trop « chevillés » aux épaules, notamment à la sortie du box. On dit aussi qu'il a les épaules « froides ». Le propriétaire peut penser que la boiterie provient de l'épaule (Denoix, 2002a; MacGregor, 1989; Rose, 1996). Il peut également être rapporté que le cheval fait souvent des refus à l'obstacle, que la foulée est irrégulière, ou qu'il est difficile de changer de pied (Leach, 1993).

B. Examen Statique

1. Inspection

L'inspection est la première étape de l'examen statique. Elle doit être réalisée dans un endroit calme, suffisamment éclairé, sur un sol plat et ferme.

Il convient de réaliser dans un premier temps un examen à distance où l'on s'intéressera aux aplombs des membres, à la symétrie des masses musculaires et des reliefs osseux ainsi qu'à l'attitude globale du cheval.

Lors de syndrome naviculaire on peut observer une asymétrie musculaire avec une amyotrophie plus marquée sur le membre boiteux ou le plus boiteux. C'est un critère non spécifique mais néanmoins un bon marqueur de la chronicité de l'affection (Wright, 1993a). Les chevaux atteints de maladie naviculaire présentent souvent une posture de soulagement qui consiste à « pointer » en avant le membre atteint de façon à soulager les talons. On dit que le cheval « montre le chemin de St Jacques » en référence à la rue de Paris où se trouvaient les anciens abattoirs. Si ce signe est décrit par de nombreux auteurs (Denoix, 2002a; Leach, 1993; MacGregor, 1989; Wright, 1993a), il n'est pas pathognomonique et surtout difficile à interpréter sur un cheval au repos.

On réalise ensuite un examen plus rapproché qui consiste à évaluer membre par membre leur conformation, leur équilibre et l'éventuelle présence de tares.

Cet examen permet de révéler un pied plus étroit, plus vertical avec des talons plus hauts et une sole plus concave du côté le plus atteint. En effet le pied affecté s'atrophie, il « s'encastèle ». Cette contracture des talons provient du fait qu'ils sont moins mis en charge lors du poser du pied chez un cheval naviculaire car celui-ci va prioritairement poser le pied en pince pour éviter toute pression sur la fourchette. Si cette atrophie du sabot se retrouve dans la plupart des cas, 80% selon Mac Gregor (MacGregor, 1984), ce n'est pas toujours le cas et il faut donc rester critique face à un pied encastelé.

En plus de l'atrophie du sabot, on pourra observer des ruptures de l'axe pied-pâturon vers l'arrière ainsi que des déséquilibres latéro-médiaux dans une moindre mesure. Ces observations sont plus des conséquences que des causes de la maladie naviculaire (Wright, 1993a). En revanche, comme vu précédemment, une conformation « *low heel long toe* » ou « pince longue/talons bas voire fuyants » est plus à interpréter comme étant une prédisposition à développer par la suite un syndrome podotrochléaire.

On peut noter également une augmentation de l'usure de la paroi du sabot en pince qui est conséquente au poser en pince observé lors de maladie naviculaire. Cependant ici encore, ce symptôme n'est pas pathognomonique et peut-être dû à des problèmes de ferrure, à la nature et la fréquence du travail ou au type de sol...(Stashak, 2002; Wright, 1993a).

2. Palpation et Pression

Cette étape de l'examen statique permet de mettre en évidence des zones de chaleurs, des zones d'asymétrie ou des déformations non visibles à la vue seule.

En phase aigüe on pourra noter la présence de poulx digités ainsi qu'une chaleur dans le creux du pâturon. Ce sont des signes importants de l'inflammation dans le pied (Denoix, 2002a).

On réalise ensuite le « test à la pince » qui consiste à appliquer une pression à l'aide d'une pince exploratrice sur les différentes zones du pied : pince, mamelles, quartiers, talons, et glomes puis entre chaque lacune latérale de la fourchette et la paroi opposée et enfin sur le tiers moyen de la fourchette. Une réponse positive sur le tiers médian de la fourchette est un point important qui oriente le diagnostic vers un syndrome naviculaire, le test exerçant une pression dans la zone de l'os naviculaire. Cependant les avis des auteurs diffèrent sur la valeur de ce test : Wright trouve une douleur dans 11% des cas (Wright, 1993a), Rose trouve 72.9% de cas positifs (Rose, 1978) et Mac Gregor 45% (MacGregor, 1984). Ainsi si une réponse positive est fortement évocatrice d'atteinte naviculaire, une réponse négative ne permet pas de l'exclure.

On pourra également observer une réponse positive lors de la pression en pince car le cheval atteint de syndrome naviculaire a tendance à poser en pince (Rose, 1996).

3. Mobilisation passive

La mobilisation passive constitue la dernière partie de l'examen statique et consiste à évaluer l'amplitude des mouvements des articulations ainsi que l'absence de douleur lors de la réalisation de ces tests.

On réalise notamment deux types de tests : la flexion digitale et l'hyperextension interphalangienne. Lors du premier test on met en flexion les articulations métacarpo-phalangienne et interphalangiennes, ce qui met en compression l'os naviculaire entre les phalanges moyenne et distale. On obtient une réponse positive lors de synovites ou de lésions ligamentaires ou tendineuses de l'appareil podotrochléaire.

Le test d'hyperextension interphalangienne ou « test à la planche » est réalisé en posant le pied à tester sur l'extrémité antidérapante d'une planche puis en levant progressivement l'autre extrémité de la planche après avoir préalablement levé le membre opposé grâce à un aide. Il provoque une hyperextension de l'articulation interphalangienne distale, ce qui met en tension les ligaments sésamoïdiens collatéraux et distal impair, le tendon fléchisseur profond du doigt et comprime l'os sésamoïdien distal ainsi que la bourse naviculaire. Le test est considéré comme positif lorsque le cheval montre un comportement de défense : contractions musculaires, recul du corps avec obliquité du membre, relevé d'encolure puis saut de la planche (Denoix, 2002a).

C. Examen Dynamique

1. Examen au pas

L'examen au pas permet de s'intéresser plus particulièrement au mode de poser du pied et aux différentes phases de la foulée. Pour réaliser cet examen on observe le cheval sur un aller retour au pas sur un sol ferme, plat et en ligne droite d'abord puis on lui fait exécuter un huit de chiffre avec des courbes très serrées.

On s'intéresse donc en premier lieu au poser du pied : un cheval naviculaire a tendance à poser le pied d'abord en pince avant de poser les talons au lieu de poser à plat ou les talons en premier (MacGregor, 1989; Rose, 1996; Stashak, 2002; Wright, 1993a). Ce symptôme est décrit par de nombreux auteurs mais selon certains, il serait plus une cause qu'une conséquence du syndrome naviculaire (Rooney, 1998; Williams, 2001; Wilson et al., 2001a). Ceci sera revu plus en détail dans la deuxième partie.

On s'attarde ensuite sur l'allure de la foulée : la boiterie est plus marquée à froid, sur sol dur et lorsque le cheval réalise un huit de chiffre de 2 à 3 mètres de diamètre en alternant main droite et main gauche. On observe alors un raccourcissement de la partie caudale de la phase d'appui de la foulée selon certains auteurs, ce qui correspond à la phase de propulsion (Bowker et al., 2001; Denoix, 2002a).

Cependant d'autres auteurs notent plutôt un raccourcissement de la phase crâniale de la phase d'appui (MacGregor, 1984; Rose, 1996; Stashak, 2002) et qui correspond à une tentative de soulager les talons en posant le pied en pince. Cela donne une foulée irrégulière, courte, saccadée où le cheval trébuche souvent (Leach, 1993).

Dans ses travaux, Wright trouvent une phase crâniale réduite dans 37,3% des cas et un raccourcissement de la phase caudale dans 16,1% des cas (Wright, 1993a). De même Williams trouve à la fois des modifications du début et de la fin de la phase d'appui de la foulée (Williams, 2001).

2. Examen au trot

On examine ensuite le cheval au trot afin de mieux caractériser la boiterie et de la localiser plus facilement. On l'observe en ligne droite et sur un cercle à chaque main, à la fois sur sol dur et sur sol souple en commençant par le dur.

Sur sol dur, la boiterie est plus marquée sur le cercle correspondant à la main du côté du membre atteint ou du plus boiteux, c'est-à-dire lorsque celui-ci se trouve à l'intérieur du cercle (Denoix, 2002a; Leach, 1993; Rose, 1996). Sur sol souple la boiterie est généralement améliorée mais reste plus marquée sur le cercle à main correspondante. Le niveau d'amélioration de la boiterie est moins important et parfois même aggravé lorsque l'on a une atteinte tendineuse du TFPD, et notamment sur un cercle à main opposée cette fois (Denoix, 2002a) où l'effort de propulsion, et donc de tension du TFPD, est plus important sur le membre situé à l'extérieur du cercle.

3. Tests de mobilisation dynamique

Il s'agit d'imposer au cheval une contrainte sur un membre pendant une minute puis de le faire trotter sur un aller retour en ligne droite sur un sol ferme et plat. On évalue alors la constance ou l'aggravation de la boiterie.

En ce qui concerne le diagnostic du syndrome naviculaire on réalise une flexion digitale. Celle-ci est déclarée positive lorsque la boiterie est aggravée lors de la flexion du membre atteint (Denoix, 2002a). On l'explique par la présence d'une synovite des

articulations du pied ou bien par l'atteinte tendineuse ou ligamentaire du syndrome naviculaire (Turner, 1989). Certains auteurs l'expliquent également par la compression de l'os naviculaire entre les phalanges moyenne et distale occasionnée par la flexion du pied (Stashak, 2002).

Il faut rester vigilant lors de la réalisation du test de flexion sur le membre controlatéral. En effet lors de la réalisation de ce test, le membre controlatéral est maintenu en l'air durant une minute, reportant tout le poids du corps sur le membre le plus atteint alors en appui sur le sol. Il n'est pas rare d'observer une aggravation de la boiterie suite à la réalisation du test de flexion sur le membre controlatéral.

D. Anesthésies sémiologiques

Les anesthésies sémiologiques sont très précieuses pour confirmer la localisation de la boiterie. En ce qui concerne le diagnostic de la maladie naviculaire, on réalise essentiellement trois types d'anesthésie : péri-nerveuse digitale distale, intra-articulaire interphalangienne distale et de la bourse naviculaire (Turner, 1989).

1. Réalisation

a) Préparation

Le site d'injection peut être tondu lors d'anesthésie péri-nerveuse et de manière systématique lors d'injection intra-articulaire. On réalise ensuite plusieurs lavages chirurgicaux de la zone à l'aide d'un savon antiseptique à base de chlorhexidine ou bien d'iode durant au moins 5 minutes. On effectue ensuite un rinçage à l'alcool.

Il convient d'utiliser une nouvelle seringue ainsi qu'une nouvelle aiguille pour réaliser l'injection. De plus, lors d'injections intra-synoviales on utilise des gants stériles et on prend une nouvelle bouteille d'anesthésique.

Pour un meilleur confort lors de la réalisation de l'injection, on peut sédater le cheval et lui mettre un tord-nez. Pour la sédation il faut utiliser un produit dont l'action est assez courte, comme la xylazine par exemple, pour ne pas fausser l'examen orthopédique par la suite.

b) Choix de l'anesthésique

Il est important d'utiliser le moins de volume possible pour éviter qu'il n'y ait trop de diffusion et donc pour être le plus spécifique possible : on utilise en général 2ml d'anesthésique.

Il existe plusieurs types de produits que l'on peut classer selon la durée de leur action :

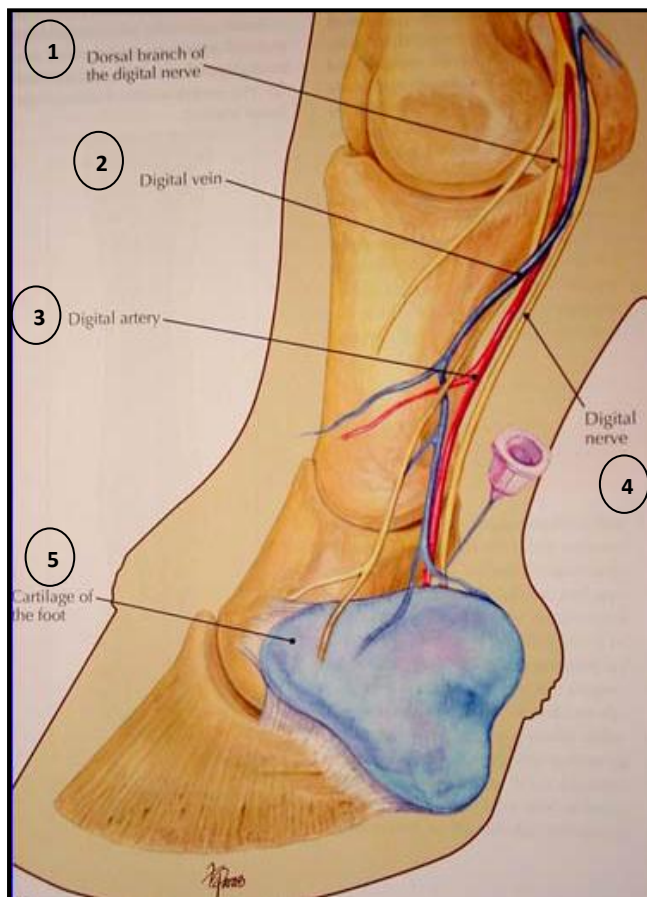
- Durée d'action courte : procaïne (30 à 60 minutes)
- Durée d'action moyenne : mépivacaïne, lidocaïne (60 à 90 minutes). On utilise majoritairement cette catégorie de molécules.
- Durée d'action longue : bupivacaïne (3 à 5 heures)

La mépivacaïne est intéressante de par son action rapide et longue, ainsi que par ses propriétés moins irritantes que la lidocaïne.

c) Sites d'injections

(1) Anesthésie péri-nerveuse digitale distale

Elle porte sur les nerfs digitaux propres palmaires, à l'extrémité digitale du paturon. Le lieu d'injection se situe au niveau du bord proximal du cartilage ungulaire sur la face palmaire du paturon, en regard du bord du tendon fléchisseur profond du doigt. Le nerf est facilement palpable lorsque le membre est levé, c'est pour cela que l'anesthésie est réalisée sur membre levé, soutenu en dessous du boulet.



On utilise une aiguille 16 x 0.5 mm (orange 25 gauges) que l'on implante en sous cutané jusqu'à la garde, démontée de la seringue (cf Figure 13). Il faut aspirer afin de vérifier l'absence de sang puis on injecte environ 2ml. La technique est la même pour les nerfs latéral et médial.

L'anesthésie fait effet en 5 minutes.

Figure 13 : Site d'injection de l'anesthésie péri-nerveuse digitale distale

(d'après Moyer et al., 2011)

- 1 Branche dorsale du nerf digital
- 2 Veine digitale
- 3 Artère digitale
- 4 Nerf digital
- 5 Cartilage ungulaire

(2) Anesthésie intra-articulaire interphalangienne distale

Le site d'injection se situe environ 1cm au dessus du bord coronaire au niveau de la face dorsale du pied. On implante une seringue de 20 gauges (jaune) démontée de la seringue en la dirigeant horizontalement et palmairement jusqu'à ce que du liquide synovial apparaisse (cf Figure 14). On peut au besoin aspirer un peu avec la seringue. Le volume d'anesthésique est d'environ 5 à 8ml. L'anesthésie prend effet en 5 minutes environ.

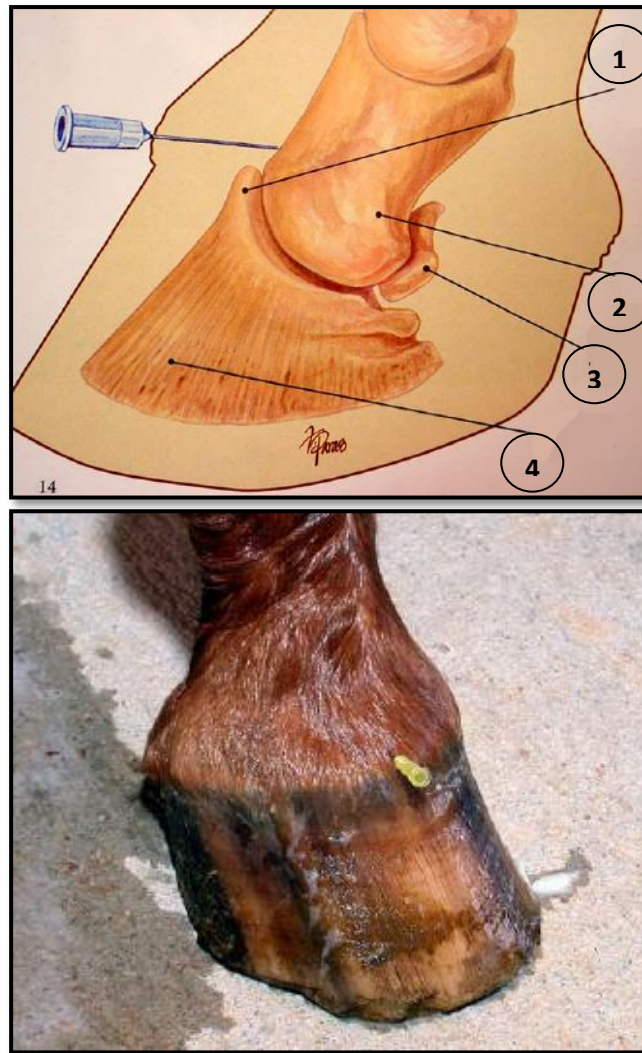


Figure 14 : Site d'injection de l'anesthésie intra-articulaire interphalangienne distale

(d'après Moyer et al., 2011)

1 Processus extensorius

3 Os sésamoïdien distal

2 Phalange moyenne

4 Phalange distale

(3) Anesthésie de la bourse naviculaire

Il existe cinq techniques différentes pour injecter dans la bourse naviculaire. L'injection peut-être : palmaire distale parallèle à la couronne, palmaire distale parallèle à la sole, palmaire proximale, latérale et palmaire distale avec l'aiguille dirigée vers l'os naviculaire. Cette dernière est considérée comme la plus fiable mais présente néanmoins l'inconvénient de traverser le tendon fléchisseur profond (Schramme et al., 2000).

Il est nécessaire d'utiliser une aiguille spinale 18 Gauges (Rose) que l'on dirige « vers l'os naviculaire », c'est-à-dire vers un point situé 1cm distalement à la couronne et à mi-distance entre le point le plus dorsal et le point le plus palmaire. On avance l'aiguille jusqu'à rencontrer une résistance osseuse qui correspond à la *facies flexoria* (cf Figure 15).

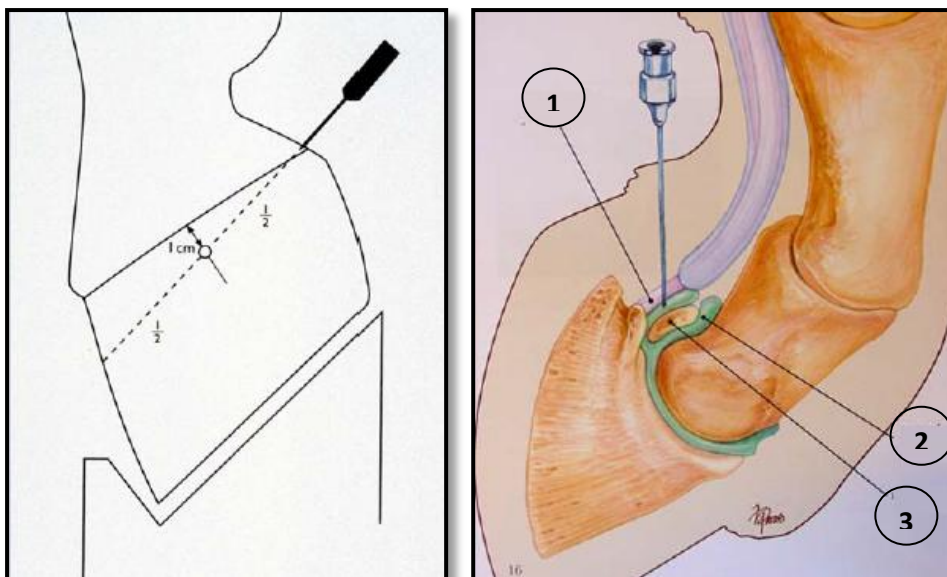


Figure 15 : Schémas de l'injection de la bourse naviculaire par l'approche palmaire distale

(d'après Moyer et al., 2011)

- 1 Tendon fléchisseur profond du doigt 3 Os sésamoïdien distal
 2 Récessus palmaire proximal de l'articulation interphalangienne distale

2. Interprétation

a) Anesthésie péri-nerveuse digitale distale palmaire

Cette anesthésie permet d'insensibiliser l'appareil podotrochléaire, la sole, l'articulation interphalangienne distale, les tissus mous de la région palmaire, la portion distale du tendon fléchisseur profond, les ligaments sésamoïdiens distaux et parfois l'articulation interphalangienne proximale en fonction de la quantité de produit injecté et de l'inclinaison plus ou moins dorsale de l'aiguille (Moyer et al., 2011).

Les chevaux atteints de maladie naviculaire doivent présenter une nette amélioration de la locomotion suite à cette anesthésie. Les auteurs trouvent une amélioration chez environ 90% des chevaux naviculaires (MacGregor, 1984; Turner, 1989). Cependant il y a plusieurs raisons pour lesquelles un cheval atteint de maladie naviculaire peut ne pas répondre complètement à l'anesthésie tronculaire digitale palmaire (Stashak, 2002):

- La présence d'adhérences fibreuses entre l'os naviculaire et le TFPD qui empêchent le cheval de modifier son allure. Elle sera améliorée du fait de la disparition de la douleur mais le pied continuera à se poser au sol en pince et la phase antérieure de la foulée restera courte. C'est une altération mécanique de la foulée qui ne peut être améliorée par anesthésie.
- Une arthrite de l'articulation interphalangienne distale lors de maladie naviculaire sévère. La névrectomie digitale palmaire ne donnera d'ailleurs que des résultats partiels.

- Certains chevaux naviculaires peuvent développer une arthrite au boulet en parallèle du fait de la conformation trop verticale du pâturon.
- Enfin il existe des variations anatomiques de la distribution nerveuse à partir du rameau dorsal du nerf digital ou à partir de son rameau palmaire qui faussent le résultat de l'anesthésie nerveuse.

b) Anesthésie intra-articulaire interphalangienne distale

Bien qu'anatomiquement il n'y ait pas de communication entre la bourse naviculaire et l'articulation interphalangienne distale (AIPD), il semblerait que des produits de faible poids moléculaire tels que les agents anesthésiques, puissent diffuser à travers la membrane synoviale et se retrouver dans la bourse naviculaire (Bowker et al., 1993b).

De plus la majorité des fibres sensorielles innervant l'os naviculaire et ses ligaments se trouve le long de la surface dorsale des ligaments sésamoïdiens collatéraux et distal impair (Bowker et al., 1995). Ainsi l'anesthésie de l'AIPD est susceptible de provoquer la désensibilisation de ces nerfs : après 5 minutes l'agent anesthésique diffuse dans les tissus mous, dont le ligament sésamoïdien distal impair, permettant la désensibilisation de l'os naviculaire (Schumacher et al., Floyd and Mansmann, 2007, chap. 9).

D'autre part le récessus palmaire proximal de l'AIPD est proche anatomiquement des nerfs digitaux palmaires proximement à l'origine des branches qui innervent à la fois l'AIPD et la bourse podotrochléaire (Schumacher et al., 2003). L'injection de l'AIPD doit donc probablement anesthésier les nerfs digitaux palmaires, provoquant la désensibilisation de l'os naviculaire et des structures adjacentes.

Fort de ces considérations sur la diffusion des agents anesthésiques, nous pouvons donc voir qu'une réponse positive à l'anesthésie intra-articulaire interphalangienne distale ne veut pas forcément dire que le problème provient de l'AIPD (Dyson and Kidd, 1993). La réalisation de l'anesthésie de la bourse naviculaire en parallèle de celle de l'AIPD apporte beaucoup plus d'informations que la réalisation de l'anesthésie de l'AIPD seule, qui est difficilement interprétable (Dyson and Kidd, 1993). Même si certains auteurs le préconisent, il est difficile de se baser sur le temps entre l'injection de l'AIPD et l'évaluation de la boiterie post-analgésie pour faire la différence entre une douleur de l'AIPD et une douleur de la région naviculaire, la diffusion étant très rapide : après 7 à 9 minutes l'agent anesthésique a diffusé dans l'appareil podotrochléaire (Schumacher et al., Floyd and Mansmann, 2007, chap. 9).

D'autre part une réponse négative à l'anesthésie de l'AIPD n'exclut pas l'os naviculaire et ses structures adjacentes comme causes de la boiterie : dans une étude sur 102 chevaux atteints d'une douleur chronique dans le pied, Dyson a montré que 21% des chevaux ne répondaient pas à l'anesthésie de l'AIPD, mais présentaient une amélioration de la boiterie suite à l'anesthésie de la bourse naviculaire. Or les lésions de l'insertion distale du TFPD sont plus facilement désensibilisées après l'anesthésie de la bourse naviculaire qu'avec l'anesthésie de l'AIPD (Schumacher et al., Floyd and Mansmann, 2007, chap. 9). Ainsi les

chevaux répondant à l'anesthésie de la bourse naviculaire mais pas à celle de l'AIPD sont susceptibles de présenter des lésions de l'insertion distale du TFPD.

Le résultat de l'anesthésie est de plus dépendant de la quantité d'agent anesthésique utilisé : une injection de faible volume (<6ml) désensibilise la région dorsale de la sole alors qu'une injection de plus grand volume (10ml) désensibilise également la région palmaire de la sole (Moyer et al., 2011).

Ainsi sur une boiterie améliorée par l'anesthésie tronculaire digitale palmaire, l'évaluation de la locomotion après l'injection de l'AIPD d'un faible volume d'agent anesthésique permet de déterminer si la douleur de la région palmaire est la cause de la boiterie (Dyson and Kidd, 1993) : il est peu probable que la boiterie vienne de la région palmaire si la boiterie est améliorée par l'injection de faible volume d'agent anesthésique dans l'AIPD.

c) *Anesthésie de la bourse naviculaire*

Une réponse positive est le signe d'une bursite, d'une atteinte de l'os naviculaire et/ou de ses ligaments et/ou de l'insertion distale du TFPD (Dyson and Kidd, 1993). Même si l'anesthésie de l'AIPD provoque l'anesthésie de la bourse naviculaire, la réciproque n'est pas vérifiée ou se fait après un certain temps (20 minutes selon Schumacher) (Dyson and Kidd, 1993; Schumacher et al., 2003). En effet le site de contact entre la bourse podotrochléaire et les nerfs digitaux palmaires est situé distalement à l'origine des branches innervant à la fois l'AIPD et la bourse, alors que le contact entre le récessus palmaire de l'AIPD et ces nerfs est située proximale (Schumacher et al., 2003).

L'analgésie de la bourse naviculaire permet d'aider dans la différenciation d'une atteinte de l'AIPD par rapport à une atteinte de la région naviculaire : une atteinte de l'AIPD peut-être exclue si la boiterie est améliorée dans les 10 minutes suivant la réalisation de l'analgésie de la bourse naviculaire (Schumacher et al., 2003).

Les interprétations des anesthésies de la bourse naviculaire et intra-articulaire interphalangienne distale sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 1 : Interprétation des résultats des anesthésies de l'articulation interphalangienne distale et de la bourse naviculaire

		Anesthésie de l'articulation interphalangienne distale	
		+	-
Anesthésie de la bourse naviculaire	+	Douleur provenant de la région naviculaire	Atteinte de la région naviculaire avec probablement des lésions au niveau de l'insertion distale du TFPD
	-	Douleur provenant d'une atteinte de l'articulation interphalangienne distale (arthrite...) ou d'une douleur au niveau de la sole	La douleur n'a pas pour origine une structure du pied

V. Examens complémentaires d'imagerie

A. Diagnostic radiographique

1. Technique

a) Préparation du pied

Il est essentiel de retirer les fers et de curer et brosser les pieds avant de réaliser des radiographies du pied afin d'éviter au maximum les artéfacts. De plus les lacunes de la fourchette doivent être comblées à l'aide de pâte à savon afin de limiter les artéfacts dus aux irrégularités de la forme de la fourchette lors des vues dorsoproximale-palmarodistale et palmaroproximale-palmarodistale oblique (Butler et al., 2011).

b) Les différentes vues

Pour une évaluation complète de l'os naviculaire, il est recommandé de réaliser des vues latéromédiale, palmaroproximale-palmarodistale oblique et dorsoproximale-palmarodistale oblique.

(1) Projection latéromédiale

Cette vue est réalisée avec le pied posé sur une plaque de bois afin de le surélever du sol. La cassette est posée sur le sol, du côté médial du pied et contre celui-ci, dans le plan sagittal. Le faisceau des rayons X est centré sur le milieu de la couronne et est perpendiculaire à la cassette et parallèle au sol (cf Figure 16).

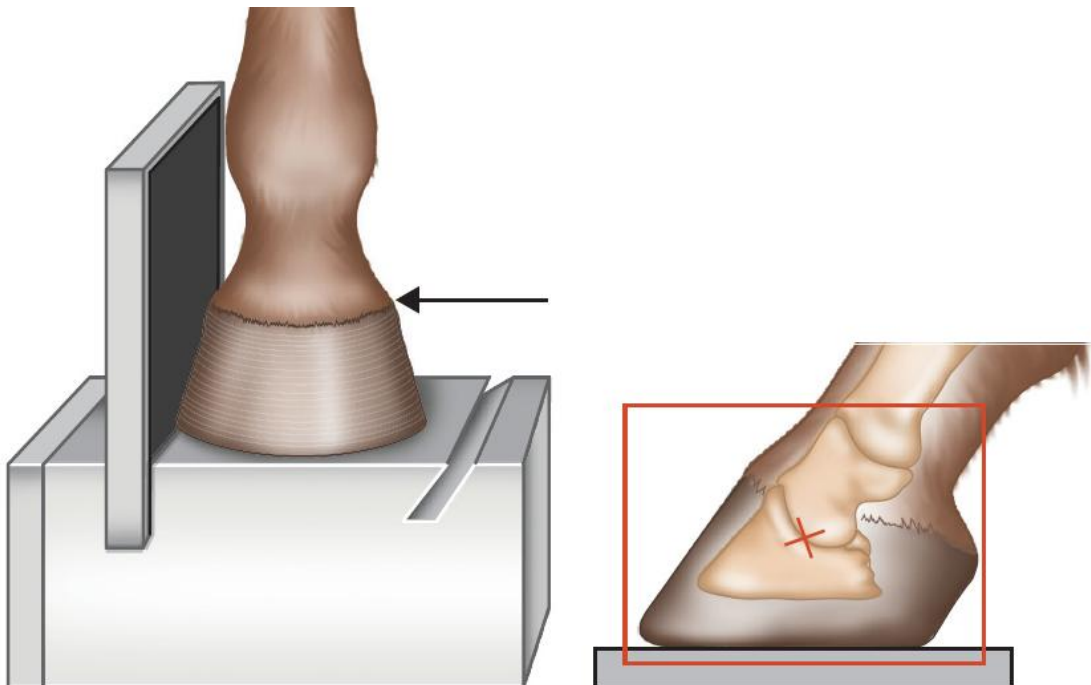


Figure 16 : Positionnement de la cassette et du faisceau des rayons X lors d'une vue latéromédiale du pied (d'après le Handbook of Equine Radiography)

(2) Projections dorsoproximales-palmarodistales obliques (DPr-PaDiO)

Il existe deux méthodes pour réaliser ces vues, la « vue coronaire haute » (high coronary view) et la « vue pied vertical » (upright pedal view).

Pour la vue coronaire haute, le pied est placé sur un bloc dans lequel est placée la cassette. Le faisceau est dirigé selon un angle variant, en fonction des auteurs, de 45° à 65° par rapport à l'horizontale, et centré 2 à 3 cm au-dessus de la bande coronaire sur la ligne médiane (Campbell and Lee, 1972). Il peut-être intéressant de réaliser deux vues en modifiant l'inclinaison de 10 à 15°. Cette technique présente deux désavantages principaux qui entraînent une déformation de l'image radiographique : le faisceau n'est pas perpendiculaire au film de la cassette et la cassette n'est pas parallèle à la surface palmaire de l'os naviculaire. Elle est cependant plus simple à réaliser, nécessitant une contention moindre (Butler et al., 2011).

Pour la vue avec le pied vertical, le pied est placé sur une cale inclinée afin que la paroi dorsale du pied forme un angle d'environ 85° avec le sol. La cassette est placée palmairement au pied, le plus proche possible de celui-ci, verticalement et dans le plan frontal. Le faisceau est horizontal et centré 2 à 3 cm au-dessus du bord coronaire (cf Figure 17). Cette vue permet d'avoir de meilleures images car moins déformées par rapport à la vue coronaire haute (Butler et al., 2011). Elle permet de bien mettre en évidence le bord distal de l'os naviculaire. On peut réaliser une deuxième vue en faisant cette fois-ci prendre au pied un angle de 90° avec le sol et en centrant le faisceau sur le bord coronaire : on distingue mieux le bord proximal et le corps de l'os naviculaire (Butler et al., 2011).

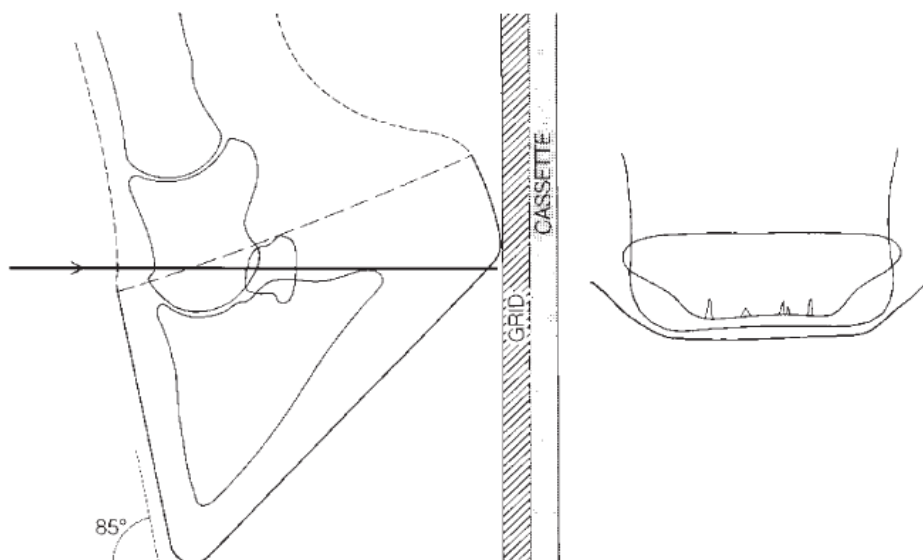


Figure 17 : Vue dorsoproximale-palmarodistale (DPr-PaDiO) 85° oblique (85° upright view) à gauche, et la position de l'os naviculaire résultant sur la radiographie à droite.

Le bord distal de l'os naviculaire est bien distinct de l'articulation interphalangienne distale. La grille (« Grid ») permet d'améliorer l'image radiographique. (d'après Butler et al., 2011)

(3) Projection palmaroproximale-palmarodistale oblique (« Skyline »)

Pour la réalisation de cette vue, le pied est posé en arrière sur un support contenant la cassette, de manière à provoquer son hyperextension pour bien dégager l'os naviculaire. Le faisceau est centré au dessus des glomes, dans le creux du paturon, avec un angle d'environ 45° avec l'horizontale pour être approximativement parallèle à l'axe de la face palmaire de l'os sésamoïdien distal (Butler et al., 2011). Cette projection permet d'évaluer la *facies flexoria* de l'os naviculaire et la démarcation entre le cortex et la moelle.

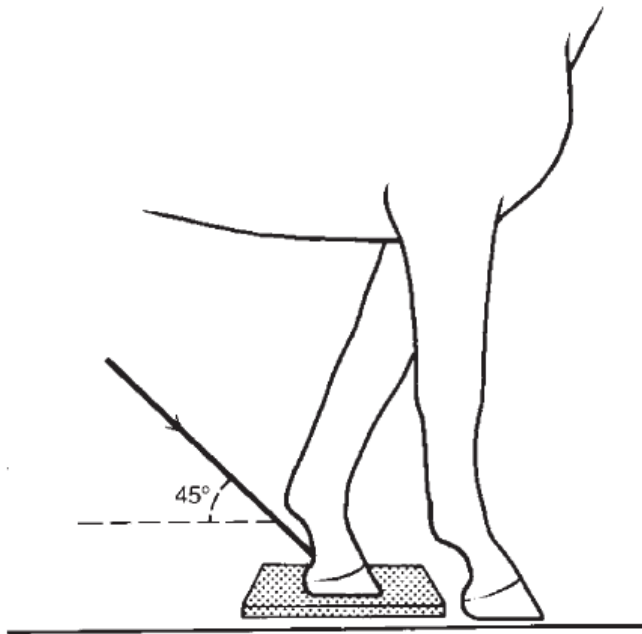


Figure 18 : Vue palmaroproximale-palmarodistale oblique ("Skyline")

(d'après Butler et al., 2011)

(4) Projection dorsopalmaire

Il est possible de réaliser une simple vue dorsopalmaire du pied en posant celui-ci sur une cale pour le surélever. Le faisceau est centré sur la couronne de la face dorsale du pied et reste horizontal, perpendiculaire à l'axe des glomes (Butler et al., 2011). La cassette est positionnée palmairement au pied dans l'axe des glomes. Cette vue ne fait pas réellement partie de l'examen de l'os naviculaire mais peut s'avérer intéressante pour recueillir des informations complémentaires sur la conformation du pied ou lors de fractures.

2. Interprétation

a) Anatomie radiographique

Sur la vue latéromédiale la face palmaire de l'os naviculaire apparaît en deux lignes, la plus palmaire étant la crête médiane et la plus dorsale étant la surface palmaire de l'os à proprement parler. Il est fréquent d'observer une dépression lisse dans la partie centrale de la crête médiane. Le cortex et la cavité médullaire sont facilement identifiables (Butler et al., 2011).

Sur la vue dorsoproximale-palmarodistale 65° oblique l'os naviculaire est superposé à la phalange moyenne. Sa forme peut varier d'un cheval à l'autre mais reste semblable à celle observée sur le membre controlatéral. Le bord distal est dessiné par deux lignes : la plus proximale représentant l'articulation de l'os naviculaire avec la phalange distale, et l'autre la zone d'attache du ligament sésamoïdien distal impair (cf Figure 19 Figure 20). On peut distinguer la présence de zones radiotransparentes triangulaires situées sur le bord distal de l'os naviculaire et correspondant à des invaginations synoviales (Kaser-Hotz and Ueltschi, 1992).



Figure 19 : Image radiographique d'une vue dorsoproximale-palmarodistale 65° oblique (d'après Butler et al. 2011)

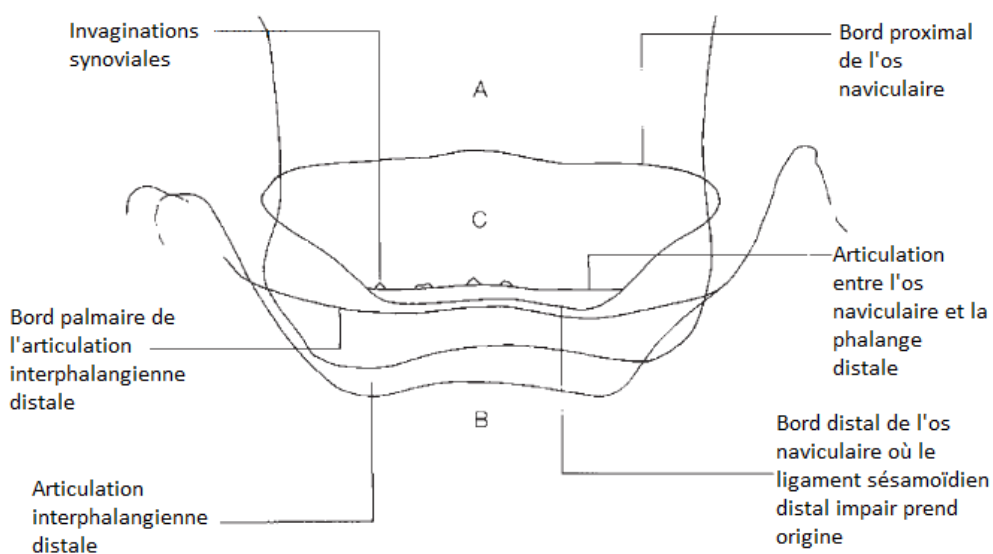


Figure 20 : Schéma de l'image radiographique d'une dorsoproximale-palmarodistale 65° oblique (d'après Butler et al., 2011)

- A. Phalange moyenne
- B. Phalange distale
- C. Os naviculaire

La vue palmaroproximale-palmarodistale oblique permet de bien faire la distinction entre le cortex palmaire et la cavité médullaire et de voir le bord proximal de l'articulation entre l'os naviculaire et la phalange moyenne (Kaser-Hotz and Ueltschi, 1992). Le cortex fléchisseur est lisse et d'épaisseur homogène, ce qui peut varier selon la race et le cheval, mais il est toujours bien délimité par rapport à la cavité médullaire (cf Figure 21 Figure 22). Les invaginations synoviales du bord distal de l'os naviculaire sont également visibles, superposées à la cavité médullaire (Butler et al., 2011). Une zone radio-transparente en forme de croissant est parfois retrouvée au niveau de la crête sagittale. Elle correspond à un remodelage précoce de l'os naviculaire en réponse au stress mécanique.

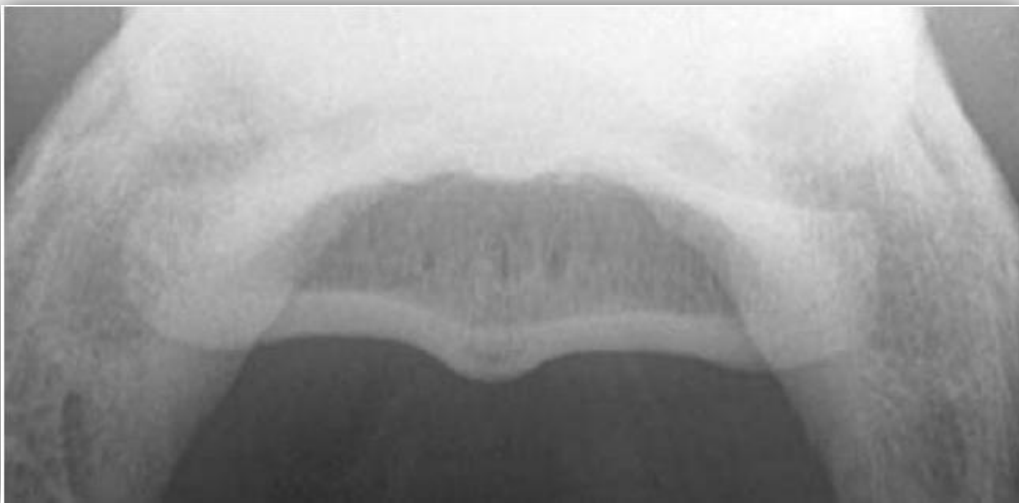


Figure 21 : Image radiographique d'une vue palmaroproximale-palmarodistale oblique (d'après Butler et al. 2011)

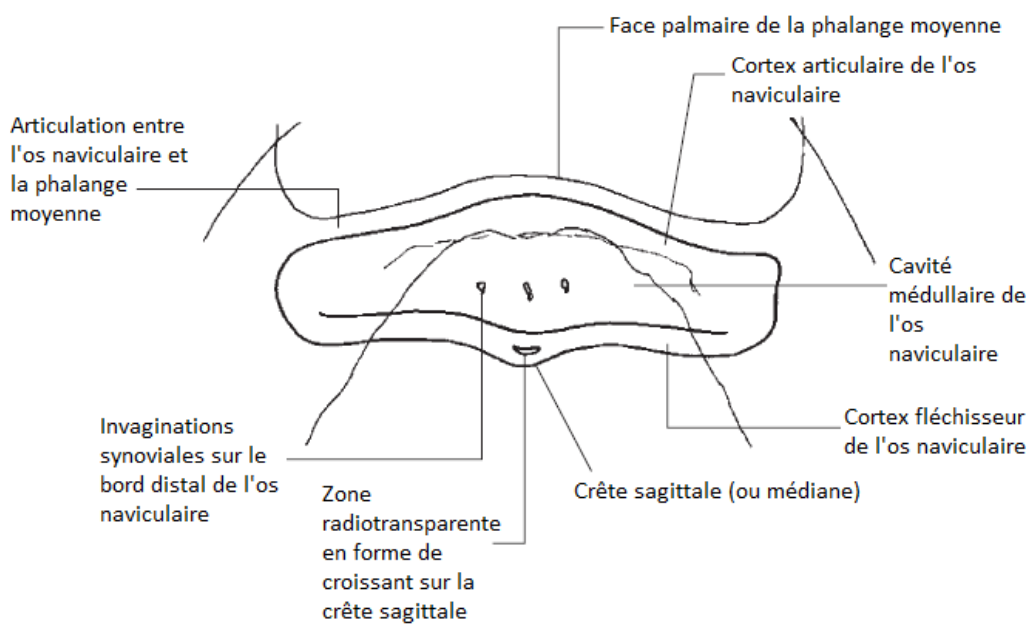


Figure 22 : Schéma de l'image radiographique d'une vue palmaroproximale-palmarodistale oblique (d'après Butler et al. 2011)

b) Lésions radiographiques

(1) Bord distal de l'os naviculaire

Les principales lésions rencontrées sur le bord distal de l'os naviculaire sont des zones radio-transparentes qui ont longtemps été sujet à controverse quant à leur signification anatomique et clinique. Elles sont visibles sur les vues DPr-PaDi-65°O et PaPr-PaDiO (Dyson, 2011). Il semble qu'il s'agisse d'invaginations synoviales de l'articulation interphalangienne distale (Poulos and Smith, 1988). Leur taille, leur nombre et leur position varie selon l'état d'avancement de la maladie naviculaire (Butler et al., 2011; Colles, 1982; MacGregor, 1984; Rose, 1978). Il existe ainsi plusieurs formes distinctes qui ont une implication pathologique différente : Mac Gregor a d'ailleurs associé une valeur à chacune de ces formes afin de permettre le calcul d'un score global pour l'os naviculaire étudié (cf Figure 23)(MacGregor, 1986). Cette méthode est intéressante pour comparer deux membres ou bien deux chevaux entre eux mais elle présente des limites pour l'évaluation individuelle d'un cheval étant donné que la distinction entre les scores des chevaux atteints et ceux des chevaux sains n'est pas marquée. Les lésions radiographiques doivent donc toujours être interprétées à la lueur de la clinique.

Il semble ainsi que les invaginations synoviales ont probablement une implication clinique lorsque leur nombre est supérieur à 7 et/ou que leur forme perd son caractère conique normal et prend plus une allure dite de « champignon » : plus elles sont larges, plus elles peuvent être reliées à la clinique (MacGregor, 1986). De plus, celles situées sur les bords médial et latéral du bord distal de l'os ont une valeur pathologique plus importante (Butler et al., 2011). On peut observer parfois de la sclérose en périphérie de ces invaginations.



Figure 23 : Schéma de l'image radiographique de l'os naviculaire en vue DPr-PaDi-65°O ("upright view")

Les chiffres correspondent au système de notation de Mac Gregor.

(d'après Butler et al., 2011)

Des fragments minéralisés sur les marges latérale ou médiale du bord distal de l'os naviculaire peuvent également apparaître. Leur prévalence est plus importante chez les chevaux atteints de maladie naviculaire, notamment lorsqu'ils sont associés à d'autres lésions de l'os naviculaire (Butler et al., 2011; Dyson, 2011; Wright, 1993b). On les met en évidence par la présence d'une zone radiotransparente aux contours irréguliers sur les marges latérale ou médiale du bord distal, associée à un fragment distalement à cette lésion (Dyson, 2011) : ils correspondent à des avulsions d'enthésophytes au niveau de l'origine du LSDI, de minéralisation ectopique du ligament, ou de fracture de l'os naviculaire.

(2) Cortex de la facies flexoria

Le cortex fléchisseur peut s'épaissir en empiétant sur la cavité médullaire, confirmant un processus pathologique dans l'os naviculaire (Butler et al., 2011; Dyson, 2011). On évalue son épaisseur sur les vues LM et PaPr-PaDiO. On peut également observer une extension proximale ou distale du cortex fléchisseur (cf Figure 24) : une extension distale reflète un stress chronique au niveau de l'insertion du LSDI, et une extension proximale, un stress chronique à l'insertion des LSCs (Dyson, 2011).

De larges zones radiotransparentes peuvent être mises en évidence dans le cortex fléchisseur en vue PaPr-PaDiO (cf Figure 25). Ces lésions ont toujours une implication pathologique (Doige and Hoffer, 1983; Wright, 1993b) et sont associées à une érosion du fibrocartilage recouvrant la face palmaire de l'os naviculaire, ainsi qu'à des adhésions avec le TFPD dans les stades avancés de maladie naviculaire (Butler et al., 2011; Dyson, 2011). On les retrouve essentiellement au niveau de la crête sagittale ou juste abaxialement à celle-ci (Dyson, 2011).

La crête sagittale peut faire l'objet d'une ostéoprolifération, visible en vue PaPr-PaDiO. Cette lésion peut être la seule visible en radiographie et être responsable de la clinique (Dyson, 2011).

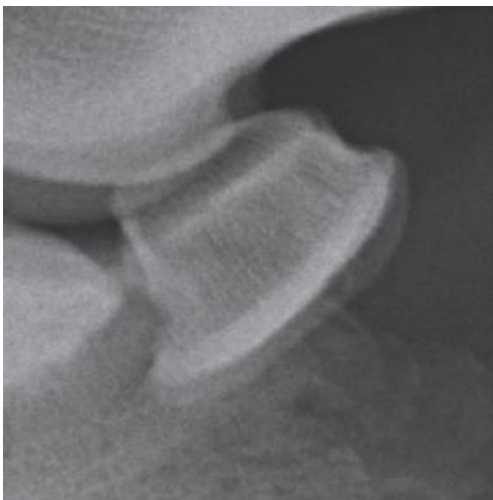


Figure 24 : Vue latéromédiale d'un os naviculaire ayant une extension proximale et distale du cortex fléchisseur.

On note également la présence d'une large fosse synoviale sur le bord distal de l'os

(d'après Dyson, 2011)

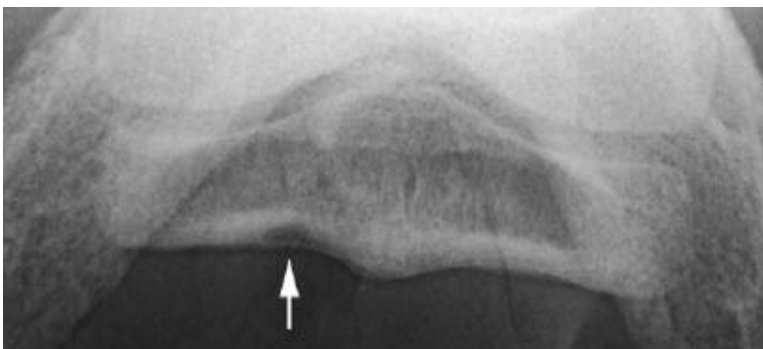


Figure 25 : Vue palmaroproximale-palmarodistale oblique d'un os naviculaire présentant une lésion radiotransparente (flèche) dans le cortex fléchisseur, abaxialement à la crête sagittale.

On note également la sclérose de la cavité médullaire.

(d'après Dyson, 2011)

(3) Cavité médullaire

Les lésions de la cavité médullaire lors de maladie naviculaire correspondent à une augmentation de son opacité, notamment dans le tiers médian de l'os sur les vues LM et PaPr-PaDiO (Blunden et al., 2006a). Il faut bien comparer ces deux incidences entre-elles, la vue PaPr-PaDiO pouvant donner une fausse impression de sclérose (Dyson, 2011; Widmer et al., 2000). L'architecture trabéculaire, normalement régulière et clairement définie devient moins évidente avec la sclérose : il est plus difficile de distinguer la démarcation de la cavité médullaire avec les cortex fléchisseur et articulaire (Butler et al., 2011; Wright, 1993b). Cette lésion peut être associée à une augmentation de l'épaisseur du cortex fléchisseur et à une érosion de celui-ci, non visible à la radiographie (Dyson, 2011).

Il est courant d'observer de larges lésions radiotransparentes, semblables à des lésions de kystes osseux au sein de la cavité médullaire, visibles en vue DPR-PaDi-65°O (cf Figure 26). Certaines lésions envahissent le cortex fléchisseur mais ce n'est pas le cas de toutes ou ce n'est pas visible radiographiquement. Elles ont toujours une implication clinique lorsqu'elles sont présentes (Dyson, 2011).

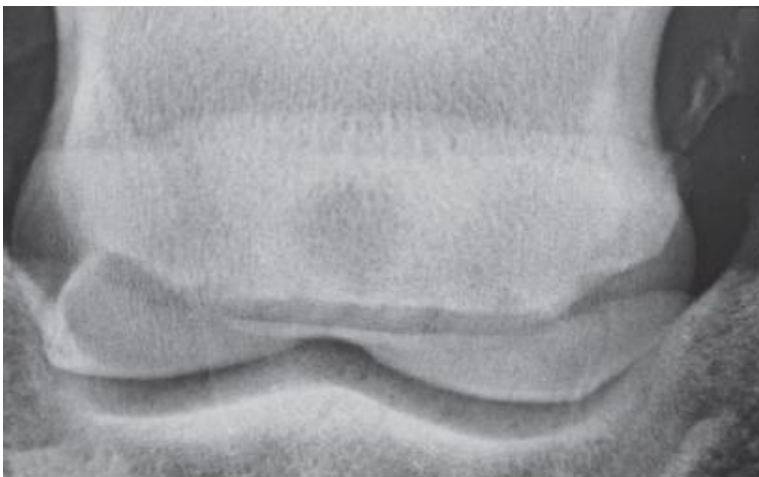
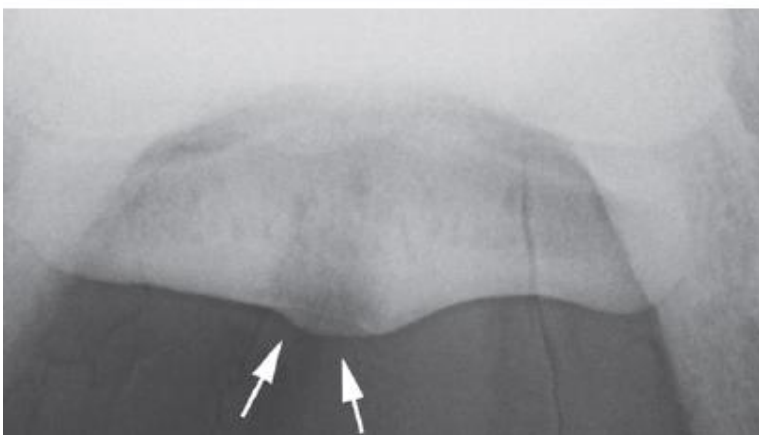


Figure 26 : Images radiographiques d'un os naviculaire

En haut : Vue dorsoproximale-palmarodistale-65° oblique. Il y a une zone radiotransparente circulaire au centre de l'os naviculaire.

En bas : Vue palmaroproximale-palmarodistale oblique du même pied que l'image du haut. On observe une large érosion du cortex fléchisseur et de la cavité médullaire (flèches). Le cortex est épaissi et la cavité médullaire est sclérosée. La démarcation cortex/medulla est mal définie.

(d'après Dyson, 2011)



(4) Enthésophytes et ostéophytes

Une minéralisation dystrophique des sites d'insertion des ligaments sésamoïdiens collatéraux aboutit à la formation d'enthésophytes sur le bord proximal de l'os naviculaire, visibles en vue DPr-PaDiO et LM. Il y a une plus grande incidence d'apparition sur l'extrémité latérale de l'os par rapport à son extrémité médiale mais selon Dyson ils n'ont pas d'implication clinique lorsqu'ils sont petits (Dyson, 2011; Kaser-Hotz and Ueltschi, 1992; Wright, 1993b). Les enthésophytes de grandes tailles, médiaux ou latéraux ont plus de signification pathologique (Butler et al., 2011).

Les enthésophytes du bord distal de l'os naviculaire à l'origine du ligament sésamoïdien distal impair tendent à être plus petits et de moindre impact clinique (Butler et al., 2011).

Des ostéophytes sont parfois mis en évidence au niveau de la marge dorsale du bord proximal de l'os naviculaire et sont les témoins d'une maladie articulaire dégénérative interphalangienne distale. Ils ne font pas partie des lésions à proprement parler de la maladie naviculaire. La présence de cette dégénérescence en association avec des lésions de maladie naviculaire assombrit en revanche le pronostic (Dyson, 2011).

Le tableau 2 résume les lésions radiographiques observées lors de maladie naviculaire et les grade en fonction de leur sévérité.

Tableau 2 : Lésions radiographiques observées lors de maladie naviculaire en les classant par grade de sévérité

Grade	Lésions Radiographiques
1	Légères modifications de forme des invaginations synoviales au niveau du bord distal de l'os naviculaire
2	Légère diminution de la démarcation cortex/medulla du fait d'une sclérose du cortex Quelques formes anormales des invaginations synoviales (<7) Extension distale ou proximale du cortex fléchisseur Léger enthésophyte sur le bord proximal de l'os naviculaire
3	Diminution de la démarcation cortex/médulla du fait d'une sclérose de la medulla Epaississement du cortex fléchisseur et présence d'érosions légères sur la crête sagittale Nombreuses formes anormales des invaginations synoviales (>7) Enthésophyte important sur le bord proximal de l'os naviculaire Légère minéralisation d'un ligament sésamoïdien collatéral Fragmentation du bord distal de l'os naviculaire
4	Lésions de « pseudo-kystes » dans la cavité médullaire Erosions sévères du cortex fléchisseur Ostéoprolifération au niveau de la crête sagittale

B. Autres examens complémentaires d'imagerie

L'apparition de nouvelles technologies en imagerie telles que l'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM) ou la tomodensitométrie (scanner) a révolutionné la connaissance des anomalies des structures anatomiques du pied pouvant être la cause de douleur et de boiterie. Ces techniques apportent une meilleure définition et un meilleur contraste permettant de diagnostiquer de nombreuses lésions avec une plus grande sensibilité (Sherlock et al., 2008).

En effet, il existe une faible corrélation entre la radiographie et la clinique observée : on peut ainsi avoir des chevaux diagnostiqués naviculaires sans lésions radiographiques significatives et inversement, certains chevaux cliniquement sains peuvent présenter des lésions radiographiques communément retrouvées lors de maladie naviculaire. Cette dernière catégorie de chevaux correspondrait à des stades précoces de la maladie (Widmer et al., 2000) : le stade clinique de la maladie naviculaire serait précédé par un stade sub-clinique et un même type de lésions pourrait être clinique chez un cheval et sub-clinique chez un autre (Sherlock et al., 2008).

De plus, la projection radiographique peut parfois donner de fausses impressions de sclérose de la cavité médullaire ou bien révéler une épaisseur de cortex inexacte, pouvant être mal interprétée par la suite (Dyson, 2011).

Ces considérations nous amènent à conclure qu'il est difficile de se baser sur le seul examen radiographique pour diagnostiquer un syndrome naviculaire.

1. Examen tomodensitométrique (scanner) et Imagerie par Résonance Magnétique (IRM)

L'examen tomodensitométrique s'avère particulièrement intéressant lorsque l'on souhaite approfondir l'étude de lésions osseuses visibles à la radiographie. Les fragments du bord distal de l'os naviculaire apparaissent en effet mieux définis, on a une meilleure visualisation de l'épaississement du cortex et de son érosion ainsi que de la sclérose de la cavité médullaire et de la présence de kystes à l'intérieur de la moelle (Widmer et al., 2000). Certains auteurs se basent sur l'évaluation des invaginations synoviales afin d'établir un score global quantifiant l'atteinte de l'os naviculaire (MacGregor, 1986) : le scanner permet de mieux caractériser leur forme, leur nombre et leur taille.

L'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM) permet de mettre en évidence des lésions, notamment des tissus mous, qui n'apparaissent ni à la radiographie ni au scanner (Dyson and Murray, 2007). Cependant son interprétation nécessite une très bonne connaissance de l'anatomie et des types de défauts pouvant être observés chez les chevaux cliniquement sain car elle permet de détecter des grades faibles de pathologies chez ces chevaux : les lésions d'IRM sont notées de 0 à 3, la boiterie n'étant visible qu'à partir du score 2 (Dyson and Murray, 2007).

Les lésions visibles à l'IRM correspondent à celles déjà décrites à la radiographie mais leur diagnostic est plus sensible et plus précoce. De plus il est possible de mettre en

évidence des érosions du fibrocartilage recouvrant la *facies flexoria* ainsi que des adhésions entre le tendon fléchisseur profond et la face palmaire de l'os naviculaire. Certains chevaux sans défauts notables du fibrocartilage, considérés histologiquement comme des lésions précoces (Blunden et al., 2006a), présentent une anomalie diffuse de la partie distale de la cavité médullaire caractérisée par un signal de faible intensité en séquence T1 et hyperintense en séquence T2 (Ross and Dyson, 2010). Ces images correspondent à une diminution de la teneur en graisse de la moelle osseuse et à une augmentation de la teneur en fluide (Busoni et al., 2005). A l'histologie on observe différentes lésions de la cavité médullaire : une augmentation de l'épaisseur des travées osseuses de l'os spongieux, une dégénérescence et une nécrose de la graisse osseuse suivi d'une fibrose de la moelle, de l'œdème osseux, ou encore de l'hémorragie. Dans les régions de l'os les plus sévèrement touchées on retrouve de la sclérose, des formations kystiques et une désorganisation de l'architecture trabéculaire (Dyson et al., 2011). Il y a donc deux mécanismes conduisant à la diminution de l'espace occupé par la moelle : l'infiltration de celle-ci (œdème, hémorragie, nécrose, fibrose, formation kystique) et l'augmentation de l'épaisseur des travées osseuses (Busoni et al., 2005). Ces images « d'œdème osseux » à l'IRM correspondent à un remodelage osseux précoce en réponse à un stress mécanique important et précèdent la dégénérescence du fibrocartilage (Schneider et al., 2003). L'œdème osseux est responsable d'une augmentation de la pression intraosseuse, causant la douleur.

En ce qui concerne le TFPD, il faut faire la distinction entre les lésions primaires de tendinite et celles liées à la maladie naviculaire car elles n'ont pas la même prise en charge (Schneider et al., 2003). L'IRM a permis de montrer que les atteintes du TFPD avaient une plus forte incidence que ce qui était admis jusque là (Ross and Dyson, 2010).

Les lésions primaires du TFPD s'étendent principalement proximale à l'os naviculaire et sont caractérisées par des fissures de l'épaisseur totale du tendon, ou bien par des érosions focales du corps du tendon. Elles sont le résultat d'un stress important répété ou d'un traumatisme aigu, possiblement superposé à une atteinte dégénérative pré-existante du tendon. Leur pathologie est différente de celle observée lors de maladie naviculaire (Dyson et al., 2003; Ross and Dyson, 2010). Les dommages observables lors de maladie naviculaire sont associées à des anomalies de l'os sésamoïdien distal et correspondent à des fibrillations de la surface dorsale du tendon, des fissures partielles focales ou bien des zones de métaplasie fibrocartilagineuse au niveau de la partie distale du TFPD. Dans les atteintes sévères on a des adhérences entre le TFPD et la *facies flexoria* (Schneider et al., 2003).

Certains chevaux présentent une desmite des ligaments sésamoïdiens collatéraux ou distal impair associée à un remodelage de l'os naviculaire au niveau des sites d'insertion de ces structures. Ces altérations sont considérées comme partie intégrante de la pathogénie du syndrome naviculaire car une atteinte de l'origine des ligaments peut ensuite être responsable d'une réaction locale d'inflammation de l'os. Les images IRM anormales sont plus fréquentes au niveau de l'insertion du LSDI (Schneider et al., 2003).

L'IRM permet également de confirmer que l'hypothèse de la bursite comme cause originelle de la maladie naviculaire est fautive, étant donné le peu de chevaux présentant des lésions de la bourse visibles à l'IRM (Schneider et al., 2003).

L'IRM permet ainsi de diagnostiquer de nombreuses lésions de la région podotrochléaire qui semblent avoir la même étiologie ou bien être inter-reliées. Il convient cependant de faire la part des choses afin de trouver quelles sont celles qui ont une réelle implication clinique. De plus l'IRM contribue au diagnostic différentiel de la maladie naviculaire avec d'autres pathologies ayant les mêmes signes cliniques : la desmite du ligament sésamoïdien droit, la tendinite proximale du TFP, l'ostéoarthrite de l'articulation interphalangienne proximale, ou l'inflammation des ailes de la phalange distale (Schneider et al., 2003). Il faut s'appuyer sur les examens complémentaires tels que les anesthésies diagnostiques, le test à la pince, l'échographie, ou l'IRM pour parvenir à distinguer ces pathologies.

2. L'échographie

L'échographie est un outil diagnostique beaucoup plus accessible en terme de prix et de matériel que ne le sont le scanner et l'IRM. Il s'avère être un bon moyen d'affiner le diagnostic. On utilise plusieurs sondes, convexes et linéaires, afin d'optimiser la visualisation complète de l'appareil podotrochléaire par abord transcutané (Schneider et al., 2008).

L'échographie permet de mettre en évidence les tendinopathies distales du TFPD, les desmopathies ou enthésopathies des LSCs ou LSDI ou les irrégularités de la *facies flexoria* (Schneider et al., 2008). L'examen du creux du paturon permet d'évaluer la bourse naviculaire et le récessus palmaire dorsal de l'articulation interphalangienne distale.

Cet examen reste cependant limité techniquement du fait de la difficulté d'obtenir des images échographiques interprétables de la zone podotrochléaire en raison de la boîte cornée : de nombreux faux négatifs peuvent être observés (Dyson et al., 2003).

3. Scintigraphie

La scintigraphie, qui consiste à injecter un produit radioactif dans le corps, permet d'apprécier les zones à haute activité métabolique osseuse. On mesure ensuite le taux de fixation du produit par l'os.

Il a été prouvé qu'il y a une augmentation du remodelage de l'os dans certaines formes de maladie naviculaire et qu'elle est corrélée à des lésions de l'os naviculaire (Ross and Dyson, 2010). Cependant cette augmentation de l'activité osseuse peut refléter une adaptation physiologique aux forces biomécaniques s'exerçant sur l'os. De plus la pathogénie de la maladie naviculaire n'étant pas toujours associée à la modification du métabolisme osseux, la scintigraphie peut créer des faux négatifs.

VI. Traitement du syndrome podotrochléaire

Le traitement du syndrome podotrochléaire doit toujours être adapté au cas par cas. Il est basé sur une bonne gestion de l'activité, une médication adaptée ainsi qu'un parage et une ferrure soulageant la douleur afin d'arrêter un potentiel cercle vicieux.

A. Traitement médical

1. Anti-inflammatoires

L'utilisation d'anti-inflammatoires non stéroïdiens (AINS) comme la phénylbutazone est intéressante pour limiter l'inflammation en phase aigüe ou favoriser la poursuite d'une activité de loisir lorsque l'atteinte est chronique. En effet les AINS inhibent la cyclo-oxygénase, stoppant ainsi la synthèse de prostaglandines, médiateur de l'inflammation. Ils diminuent également l'agrégation plaquettaire ce qui a pour effet d'améliorer le flux sanguin. Leur utilisation est bénéfique notamment au début de la mise en place d'une ferrure correctrice afin d'éliminer la douleur et de diminuer la boiterie, ou pour les chevaux continuant le travail durant le traitement initial (Stashak, 2002).

L'AINS le plus fréquemment employé est la phénylbutazone à la dose d'attaque de 4.4mg/kg deux fois par jour. Cette dose est amenée à être réévaluée en fonction de la réponse clinique du cheval et peut passer à 2.2mg/kg une à deux fois par jour. Le traitement dure environ 10 jours (Ross and Dyson, 2010).

2. Tiludronate

Le tiludronate est un régulateur du métabolisme osseux qui inhibe l'activité ostéoclastique. Etant donnée la nature dégénérative des lésions de l'os sésamoïdien distal observées lors de maladie naviculaire (sclérose médullaire, lésions « pseudo-kystiques »), ce type de traitement agissant sur le métabolisme osseux pourrait contribuer à l'amélioration de la clinique. Une étude a montré l'efficacité du tiludronate à la dose de 1mg/kg IV une fois par jour pendant 10 jours (Denoix et al., 2003). Plus le traitement est réalisé précocement, meilleur est le résultat. De plus la forte affinité du tiludronate pour les cristaux d'hydroxyapatite de l'os et le relargage lent une fois fixé aux cristaux explique l'effet observé sur le long terme : entre 3 et 6 mois (Denoix et al., 2003). Les effets positifs ne sont visibles qu'environ 2 mois après le traitement initial du fait du long processus de remodelage osseux. Une amélioration de la boiterie peut cependant être observée dans les premières semaines car le tiludronate, en inhibant la résorption osseuse, éliminerait la douleur due à ces processus pathologiques.

3. Isoxuprine

Le chlorhydrate d'isoxsuprine est un β -agoniste qui induit une vasodilatation périphérique. Son mode d'action lors du traitement de la maladie naviculaire reste inconnu mais cette molécule a déjà présenté des résultats satisfaisants. L'isoxsuprine aurait des propriétés anti-inflammatoires qui pourraient expliquer le fait que certains chevaux répondent à ce traitement (Ross and Dyson, 2010). La dose utilisée est en général de 0.6

mg/kg deux fois par jour pendant 3 à 4 semaines, puis en cas de réponse positive, il est recommandé de continuer le traitement à la même dose mais une fois par jour pendant 2 semaines. Les effets peuvent durer jusqu'à 12 mois après la dernière prise. Dans certains cas le traitement est maintenu lorsque le cheval se remet à boiter avec l'arrêt de l'isoxsuprine (Stashak, 2002). Il n'y a pas d'effets secondaires majeurs mis en évidence mais il toutefois déconseillé de l'utiliser sur les juments gestantes. Ce traitement peut éventuellement être combiné avec un anti-inflammatoire pendant une courte période si la boiterie est sévère (Ross and Dyson, 2010).

4. Warfarine

La warfarine est une molécule ayant des propriétés anticoagulantes qui est parfois utilisée pour le traitement de la maladie naviculaire. Son utilisation est basée sur l'hypothèse selon laquelle l'origine du syndrome naviculaire serait la formation de thrombi au niveau des vaisseaux irriguant l'os sésamoïdien distal. La warfarine aiderait donc à rétablir le flux sanguin au niveau de l'os naviculaire (Colles, 1982). La dose traitante varie beaucoup d'un individu à l'autre et selon la gestion du cheval. Sa mise en place nécessite un contrôle préalable du taux en prothrombine physiologique du cheval traité, ainsi qu'un suivi régulier rapproché en début de traitement puis plus espacé une fois la dose traitante établie. En général la dose est de 1mg/50kg et est amenée à être modifiée si aucune réponse n'est observée. Il n'est pas recommandé d'associer d'autres traitements avec celui de la warfarine du fait des interactions possibles entre les molécules et des complications hémorragiques observées lors d'utilisation d'anticoagulants (Colles, 1982).

L'efficacité de ce traitement est mitigée, des échecs ayant été obtenus chez des chevaux à haute performances sportives (Ross and Dyson, 2010). La justification de l'utilisation de ce type de traitement est également contestable étant donné que l'hypothèse initiale de formation de thrombi au niveau des vaisseaux de l'os naviculaire est erronée et que la mise en place du traitement et de son suivi sont lourds.

5. Traitement anti-inflammatoire local

Un traitement anti-inflammatoire local est possible par infiltration de l'articulation interphalangienne distale ou de la bourse naviculaire. On utilise majoritairement des corticoïdes comme l'acétate de méthylprednisolone ou l'acétonide de triamcinolone, auxquels on peut éventuellement rajouter de l'acide hyaluronique. Ce traitement connaît cependant des résultats mitigés au long terme même sur des chevaux où l'anesthésie intra-articulaire interphalangienne distale améliorerait la boiterie de manière significative (Ross and Dyson, 2010). Si la boiterie est améliorée à court terme dans la plupart des cas, l'effet de la molécule ne dure souvent pas plus de 3 semaines (Stashak, 2002). Schneider apporte des éléments de réponse face à ses échecs thérapeutiques : selon lui la sur-utilisation de ce type de traitement serait en cause. En effet, les injections intra-articulaires ne seraient bénéfiques qu'en cas de synovite ou de lésions radiographiques de l'AIPD. De même les injections de la bourse naviculaire n'auraient une efficacité qu'en cas de bursite avérée (Schneider et al., 2003). L'IRM apparaît donc comme un examen de choix permettant de mieux sélectionner

les candidats à ce type de traitement en confirmant de manière précise l'atteinte des structures telles que la bourse naviculaire ou les marges articulaires de l'AIPD (Schneider et al., 2003).

Les chevaux ayant des lésions sur la face dorsale du TFPD au contact de l'os naviculaire peuvent être traité par l'injection de corticoïdes, tels que l'acétate de méthylprednisolone, dans la gaine digitale (Schneider et al., 2003). En effet la gaine digitale s'étend distalement presque jusqu'à l'os naviculaire, et son injection semble être efficace sur les chevaux pour lesquels ce traitement a été réalisé (Schneider et al., 2003). La gaine est injectée distalement au ligament annulaire du boulet, sur la face palmaire sous la base des os sésamoïdiens proximaux. Certains chevaux ont continué à travailler normalement pendant deux ans sans qu'une deuxième injection ne soit nécessaire. Cette réponse au long terme est obtenue grâce à l'inhibition de la douleur au niveau du TFPD, ce qui permet au cheval d'utiliser ce dernier de manière physiologique. L'excellente réponse au traitement n'est cependant pas le cas des tous les chevaux et certains n'ont pu retourner au travail du fait de la persistance de la boiterie. On explique cela par la présence d'autres lésions au niveau de l'appareil podotrochléaire.

B. Traitement orthopédique et kinésithérapeutique

La mise au repos ponctuelle n'est pas un traitement habituellement conseillé chez un cheval atteint du syndrome naviculaire car même si dans un premier temps il améliore la boiterie, celle-ci réapparaîtra au moment de la reprise de l'exercice. De plus, c'est parfois après une période de repos pour une toute autre pathologie que les signes cliniques de la maladie naviculaire apparaissent (Ross and Dyson, 2010). Cependant des mesures orthopédiques doivent être mises en place au long terme en complément des traitements médicaux qui ont un rôle surtout dans la phase aiguë de la maladie : ces mesures de parage et de ferrures correctrices seront décrites dans une deuxième partie.

C. Traitement chirurgical

Lorsque l'arsenal thérapeutique médical et la mise en place de ferrure ne suffisent pas ou lorsque les lésions observées aux examens complémentaires sont jugées trop importantes, le traitement chirurgical apparaît alors comme une alternative intéressante.

1. Névrectomie digital palmaire

Il s'agit de la technique chirurgicale la plus commune. Elle consiste à désensibiliser la région palmaire distale du pied en sectionnant les nerfs digitaux palmaires médial et latéral. De nombreuses techniques ont été décrites mais toutes ont pour seul objectif de réduire au maximum l'incidence de la formation de névrome et de reformation de l'axone provoquant

la retour de la sensibilisation (Matthews et al., 2003). Un névrome est un épaississement douloureux des terminaisons nerveuses de type ulcératif qui se retrouve notamment lors de chirurgie d'amputation de membres.

De nombreuses complications ont été décrites, parmi lesquelles l'échec de disparition de la boiterie, ou sa réapparition, la formation de névromes, l'absence de réponse à une blessure de la sole ou de la face palmaire du pied, la sub-luxation et la luxation complète de l'AIPD, ou encore la rupture totale ou partielle du TFPD (Ross and Dyson, 2010).

Il convient ici encore de sélectionner les candidats susceptibles de répondre de manière positive à ce traitement. En effet, au vu des complications, un cheval ayant des lésions du TFPD ou ayant des antécédents de tendinites aura plus de risques de subir une rupture totale ou partielle du tendon (Ross and Dyson, 2010). De plus cette technique ne doit être réalisée que sur les chevaux répondant fortement à l'anesthésie péri-nerveuse digitale distale qui reproduit à court terme l'effet de la chirurgie de névrectomie et donne une bonne indication du potentiel succès de celle-ci (Matthews et al., 2003). Les chevaux présentant des adhérences entre le TFPD et l'os naviculaire ne sont également pas de bons candidats car ils développent souvent des tendinites proximale à la zone désensibilisée quelques semaines après la chirurgie et car ces attaches anatomiques non physiologiques peuvent être à l'origine d'un échec thérapeutique (Schneider et al., 2003). En effet si la névrectomie supprime la nociception, elle ne modifie en rien la biomécanique du pied qui peut être altérée par la présence d'adhérences entre le TFPD et l'os naviculaire (Stashak, 2002). L'examen IRM apparaît donc ici encore comme un outil non négligeable dans l'aide à la mise en place d'un traitement adéquat limitant le risque d'échec thérapeutique en diagnostiquant de manière précise les adhérences (Schneider et al., 2003).

La technique chirurgicale la plus utilisée, celle de la « guillotine », consiste à réaliser deux incisions, une médiale et une latérale, au niveau des os sésamoïdiens proximaux puis d'étirer et de sectionner sous tension sur 2 à 3 cm le rameau palmaire des nerfs digitaux propres palmaires. La mise en tension permet d'entraîner la rétraction du nerf dans les tissus mous, lui assurant une protection contre les traumatismes ce qui semble prévenir l'apparition de névrome. Il est impératif de réaliser des soins postopératoires adéquats tels que des bandages compressifs de la plaie et du repos strict au box pendant au minimum un mois afin de limiter les mouvements au niveau du site chirurgical. C'est la technique entraînant le moins souvent la formation de névrome (Matthews et al., 2003).

Elle doit cependant rester une chirurgie de dernier recours car elle fait également disparaître la majeure partie de la sensibilité du pied : un cheval peut ainsi ne pas sentir un clou planté dans la sole.

2. Desmotomie des ligaments sésamoïdiens collatéraux

La desmotomie des ligaments sésamoïdiens collatéraux est une autre technique chirurgicale parfois utilisée dans le traitement du syndrome naviculaire. Les bons résultats obtenus peuvent s'expliquer par la modification des forces biomécaniques s'exerçant sur l'os

naviculaire. De plus, la chirurgie entraîne la section des fibres nerveuses sensorielles et des complexes artério-veineux se trouvant dans le tissu conjonctif des ligaments sésamoïdiens collatéraux, ce qui est susceptible d'enrayer les processus de dégénérescence de l'os naviculaire et des structures adjacentes. Cela contribue également à la diminution de la pression intra-osseuse responsable de la douleur (Ross and Dyson, 2010; Svalastoga and Smith, 1983; Wright, 1993c).

Une étude effectuée sur 118 chevaux a montré que 76% des chevaux étaient non boiteux 6 mois après le traitement, puis 43% après 36 mois. Les échecs thérapeutiques semblaient liés à la présence d'enthésophytes, de sclérose de la cavité médullaire de l'os naviculaire, de lésions importantes de la *facies flexoria* ou de minéralisation du TFPD. Ces lésions assombrissent donc le pronostic sportif du cheval (Wright, 1993c).

PARTIE 2 : Etude Biomécanique du Syndrome Podotrochléaire

I. Etude biomécanique des différentes phases de la foulée

La foulée peut essentiellement être décomposée en deux phases :

- La phase de soutien, qui correspond au temps pendant lequel le pied du cheval est levé et est projeté vers l'avant.
- La phase d'appui entre le moment où le pied entre en contact avec le sol et celui où il le quitte. Cette phase peut elle-même être décomposée en trois temps : amortissement, soutènement et propulsion (cf Figure 27).

L'analyse qualitative des allures est appliquée avec succès lors du diagnostic des boiteries du cheval par les vétérinaires. Elle permet d'obtenir par la suite un grade de boiterie. Cependant cette méthode, si elle est excellente du point de vue de la reproductibilité par un même clinicien, s'avère insuffisante lorsqu'un même cas est évalué et comparé par plusieurs cliniciens. Il existe depuis quelques décennies de plus en plus de méthodes d'analyse biomécanique quantitative de la foulée permettant une plus grande précision, tout en excluant les biais inhérents à l'analyse qualitative. Parmi les techniques d'analyse quantitative on distingue la cinématique (étude des mouvements des membres du cheval) et la cinétique (étude des forces exercées sur le pied).

A. Dynamique des forces appliquées au pied durant la phase d'appui

L'analyse dynamique ou cinétique s'intéresse aux forces responsables du mouvement du pied du cheval. Celles-ci peuvent être quantifiées par l'intermédiaire de plaques ou de chaussures de forces. La plaque est une plate-forme incluse dans le sol et recouverte d'un revêtement antidérapant. Elle mesure les composantes verticales, horizontales et transversales de la force de réaction du sol qui s'exerce sous le pied du cheval, les positions du centre de pression ou encore les temps d'appui. Cependant elle ne permet pas d'effectuer des mesures à grandes vitesses ou bien sur différents types de sol, avec différentes ferrures, ce que permet la chaussure de force ou « fer dynamométrique ». Cet appareil se compose de 4 capteurs bloqués entre 2 pièces en aluminium en forme de fer classique qui se broche sous le sabot (Noble et al., 2011).

On utilise également un accéléromètre qui permet d'évaluer l'accélération et les vibrations subies par la structure sur laquelle il est attaché, en l'occurrence le sabot.

Les résultats obtenus avec ces instruments permettent d'illustrer la dynamique du pied à l'impact.

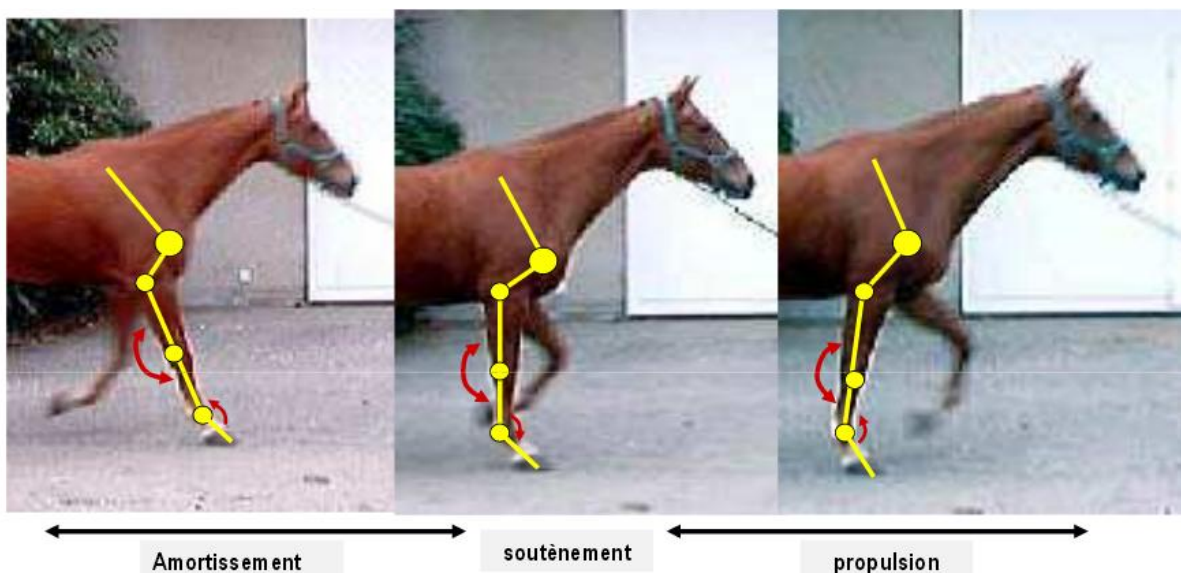


Figure 27 : Les différents temps de la phase d'appui

1. Le contact initial

Le pied entre en contact avec le sol le plus souvent par les talons, parfois par toute la surface solaire posée à plat ou plus rarement par la pince. Plus la vitesse est importante, plus le cheval aura tendance à poser en premier en talon. La fréquence du poser en pince, elle, augmente avec un mauvais équilibre du pied dans le plan sagittal : une pince longue avec des talons bas favorise ce type de contact (Back, Pille, Back and Clayton, 2013, chap. 8).

Le contact initial dépend donc de la vitesse, de l'allure, du parage et de la ferrure. La nature de l'impact conditionne le type de mouvement de bascule du sabot et détermine quelle sera la partie du sabot qui subira le choc initial ainsi que la décélération. En effet, on constate que les chevaux posent d'autant plus en talons que ceux-ci sont hauts : l'ajout de talonnettes majore donc la sollicitation de l'arrière du sabot et entraîne une augmentation de la bascule du pied vers l'avant après le contact sur sol dur.

Durant la phase d'appui, le pied subit une force de réaction de la part du sol appelée GRF (pour *Ground Reaction Force*). L'amplitude de celle-ci dépend du poids du cheval, de la vitesse du mouvement et de la surface du sol. Pour faciliter les calculs mathématiques on considère que la GRF ne s'applique qu'en un seul point appelé *Point of Zero Moment* (PZM) (Eliashar, 2012). Il s'agit du point où l'équilibre serait conservé si toutes les forces s'y appliquaient. La position du PZM ainsi que la direction et l'amplitude de la GRF changent au cours des différentes phases de l'appui : en fonction de la position du point d'application de la GRF par rapport au centre de rotation de l'AIPD, le moment de la force de réaction du sol va générer un mouvement soit d'extension soit de flexion (Wilson, Weller, Ross and Dyson, 2010, chap. 26).

Lors du contact initial d'un pied équilibré avec le sol, le PZM se trouve centré sur les talons et la GRF entraîne un mouvement rapide de bascule du pied vers l'avant caractérisé par la flexion brutale de l'AIPD.

2. Le poser du pied

Immédiatement après le contact et la rotation initiale, le sabot subit un choc important lors de l'impact sur le sol et décélère rapidement sous l'effet des forces verticales liées au poser d'une part et des forces horizontales liées au freinage d'autre part, jusqu'à atteindre une vitesse nulle. Durant cette phase deux périodes peuvent être décrites, l'une passive et l'autre active.

a) Période passive = Phase d'impact

Lors du poser, le sabot se comporte comme une masse heurtant le sol en pleine vitesse : ce mouvement passif génère un choc dont l'amplitude dépend de la vitesse du cheval et des caractéristiques des éléments en contact, à savoir le sabot ou la ferrure et la couche superficielle du sol. Cette phase est dite passive car elle implique un amortissement passif de la part du sabot qui encaisse la secousse sans contrôle neuro-musculaire.

L'amplitude du choc est quantifiée grâce à l'accéléromètre 3D par la mesure de la décélération verticale maximale. Elle est fortement influencée par les caractéristiques du sol et du fer. En effet, avec le même type de fer, la décélération verticale est d'environ 80 G ($G=9.81$) sur une surface amortissante comme une piste en sable fibré-huilé, alors qu'elle peut atteindre plus de 500 G sur une piste fortement damée comme une route goudronnée (cf Figure 28)

Ces valeurs moyennes sont obtenues sur n foulées et sont mesurées chez le même cheval se déplaçant à la vitesse de 9,7 m/s (35 km/h) sur différentes pistes. (Crevier-Denoix et al., 2009).

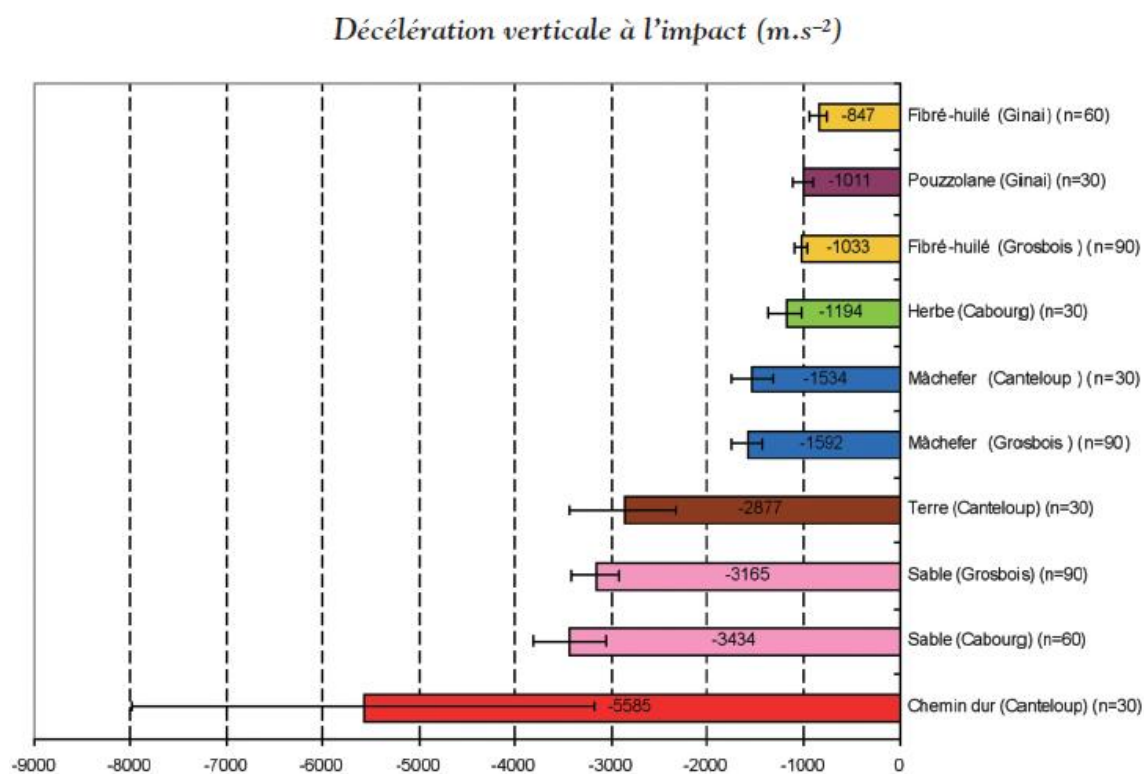


Figure 28 : Comparaison des décélérations verticales ($m.s^{-2}$) lors du poser du sabot (choc à l'impact).

Ces valeurs moyennes sont obtenues sur n foulées et sont mesurées chez le même cheval se déplaçant à la vitesse de 9,7 m/s (35 km/h) sur différentes pistes.

(d'après Crevier-Denoix et al., 2009)

Ainsi un chemin dur provoque les chocs les plus importants lors de l'impact sur le sol et est plus susceptible de créer des lésions sur le système musculo-squelettique du membre.

Le niveau d'entretien et d'humidité du sol interviennent également dans la détermination de l'amplitude du choc lors de l'impact. Celle-ci est diminuée par un facteur 2 entre une piste en mâchefer humidifiée et hersée et une piste également en mâchefer mais laissée sans entretien pendant plusieurs jours (cf Figure 29).

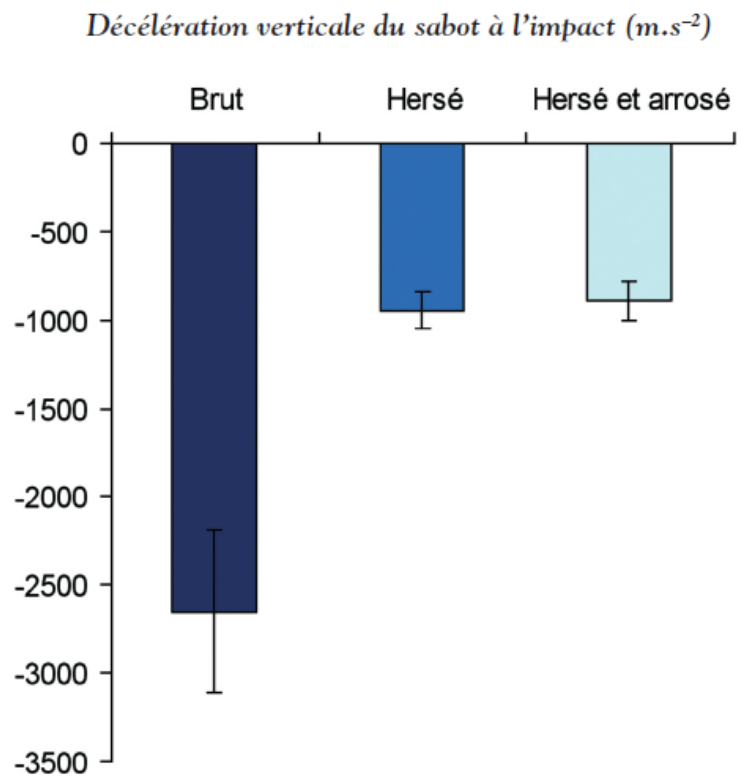


Figure 29 : Comparaison des décélérations verticales (m.s⁻²) lors du poser du sabot (choc à l'impact) mesurées chez le même cheval (cheval 1) se déplaçant à la vitesse de 9,7 m/s (35 km/h) sur une piste en mâchefer dont trois portions ont été préparées de façon différente : état « brut » (portion fermée et laissée sans entretien quelques jours), hersé, hersé et arrosé.

(d'après Crevier-Denoix et al., 2009)

Enfin, la ferrure joue également un rôle dans ce phénomène comme en témoigne une étude réalisée par Willemen qui met en évidence une augmentation d'environ 15% de l'amplitude du choc au niveau de la paroi du sabot chez un cheval ferré (avec ou sans ajout de silicone) par rapport à un cheval pied nu. Cette différence disparaît cependant au niveau de l'articulation métacarpo-phalangienne dû fait de l'atténuation des vibrations par les structures internes du pied (Willemen et al., 1999a). Cependant l'effet amortissant semble être plus dépendant de la nature de la piste que du type de ferrure et l'efficacité de l'ajout de matériaux réputés plus amortissants comme le silicone est remis en cause.

b) Période active = Phase de freinage

La phase du poser du pied se poursuit par une période active durant laquelle les efforts musculaires entrent en jeu pour assurer l'amortissement puis le soutien du corps. La mise en charge progressive du membre augmente les forces de frottements entre le pied et le sol, conduisant à l'arrêt complet du pied. Au cours de cette phase celui-ci glisse longitudinalement sur le sol vers l'avant avant de s'arrêter lorsque la composante

horizontale de la GRF est maximale (Back,Pille, Back and Clayton, 2013, chap. 8). La longueur et la durée de ce glissement varient selon la vitesse du cheval et le type de sol (Crevier-Denoix et al., 2009). En effet l’amplitude des composantes horizontales et verticales de la GRF à l’impact est plus faible sur une piste en sable fibré-huilé par rapport à une piste en sable concassé (Robin et al., 2009). En revanche il est intéressant de noter que le

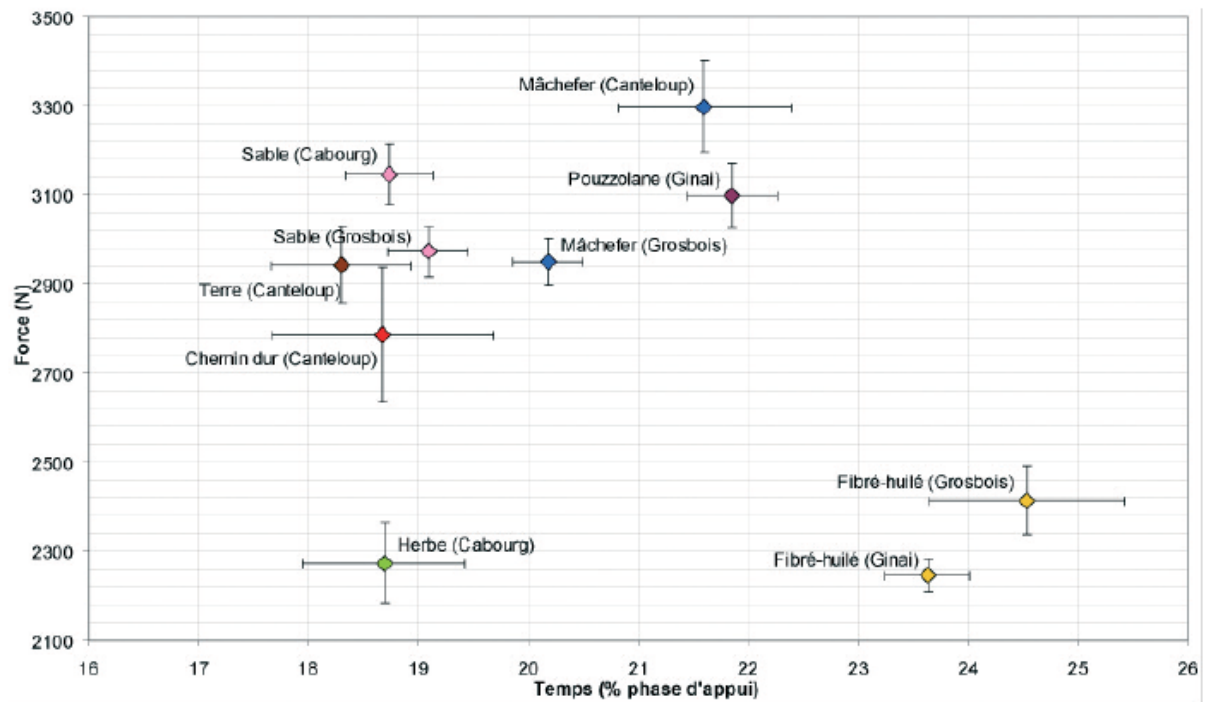


Figure 30 : Comparaison des forces maximales de freinage et de leur instant de survenue au cours de la phase d'appui, lors de tests effectués sur différentes pistes, avec le même cheval à 9,7 m/s (35 km/h).
(d'après Crevier-Denoix et al., 2009)

maximum de la composante horizontale de la GRF, également appelée « force de freinage », est atteint plus tardivement sur les pistes en fibré-huilé (cf Figure 30). Cela témoigne d'un freinage plus progressif sur ces pistes amortissantes, caractérisé par un enfoncement plus important des talons dans le sable par rapport à un sol plus dur (Crevier-Denoix et al., 2009).

La force maximale de freinage plus faible sur un chemin goudronné par rapport à une piste en sable paraît surprenante mais s'explique par un glissement longitudinal probablement plus important sur le sol dur. La composante verticale reste cependant bien plus élevée sur chemin goudronné et entraîne une forte décélération verticale comme vu précédemment.

Ainsi le sol influence le temps et la longueur de glissement ainsi que l'amplitude maximale de la force de freinage. En revanche le temps et la longueur de glissement ne semblent pas différents selon le type de ferrure mais la force de décélération horizontale est moins importante lorsque le cheval est ferré avec des fers plastiques collés par rapport à une ferrure standard ou en caoutchouc (Pardoe et al., 2001). Ainsi le cheval compense les différences d'adhérences des ferrures afin de maintenir un temps et une longueur de

glissement stables. La ferrure en plastique permet cependant de diminuer la force de freinage à l'impact.

c) Les forces mises en jeu

Les forces appliquées au pied durant cette phase peuvent être réparties en trois catégories : les forces passives, dues au poids du corps et à son inertie lors du mouvement, les forces actives dues à la contraction musculaire et les composantes horizontales et verticales de la GRF.

(1) Les forces passives

L'impact initial et les frictions entre le pied et le sol durant la phase de glissement génèrent des vibrations (cf Figure 31).

Ces phénomènes ondulatoires se propagent du sabot vers l'extrémité proximale du membre du cheval par l'intermédiaire du squelette. Ils sont rapidement atténués par les structures internes du pied : la jonction lamellaire entre le podophylle et le kéraphylle joue un rôle fondamental de « filtre passe-bas » permettant de dissiper ces vibrations à haute fréquence.

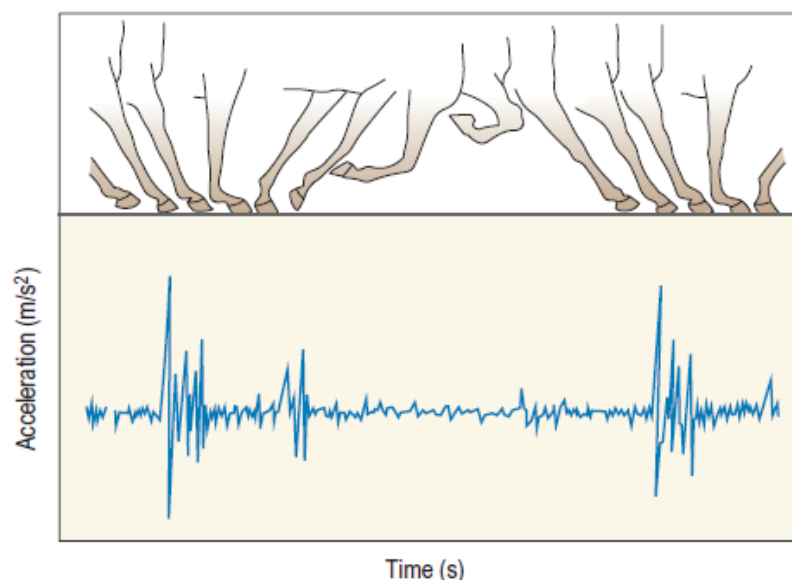


Figure 31 : Evolution des oscillations de la décélération lors des différentes phases de la foulée.

(d'après Back & Clayton, 2013, Chapter 8)

En effet près de 67% de l'amortissement des vibrations a lieu entre la paroi du sabot et la phalange distale. L'atténuation des ondes vibratoires est considérablement moins importante au niveau des articulations interphalangiennes (12%) et de l'articulation métacarpo-phalangienne (9%) (Willemen et al., 1999a). Au final seulement 12% des oscillations initiales sont ressenties au niveau du métacarpe. La Figure 31 met quant à elle en évidence la diminution progressive des oscillations de la décélération après le poser du pied. Le deuxième bloc d'oscillations observé, d'amplitude maximale moins importante, correspond à la phase de propulsion.

Comme vu précédemment, ces phénomènes dynamiques sont largement influencés par la vitesse du cheval, la raideur de la piste et la nature de la ferrure. Une surface permettant au pied de mieux glisser dissipe plus d'énergie à l'impact et diminue l'amplitude des ondes générées (cf Figure 28 et Figure 29) (Chateau et al., 2009; Crevier-Denoix et al., 2009). Plus le terrain est dur et rugueux, plus les composantes haute fréquence (>400Hz) des

ondes vibratoires sont représentées. Ainsi avec un sol plus amortissant on réduit l'amplitude maximale de décélération ainsi que les vibrations engendrées par le choc et le glissement, et la décélération est plus progressive.

(2) La force de réaction du sol

Comme décrit plus haut, cette force correspond à la GRF (*Ground Reaction Force*) et elle est généralement dissociée en deux composantes, une verticale et une horizontale. Elle est l'opposée de la résultante des forces actives et passives.

- Composante horizontale :

La composante horizontale F_x s'exprime dans le sens opposé au mouvement, vers l'arrière, lors du poser du pied, ce qui correspond à une force de freinage. Son tracé au cours de la phase d'appui montre un premier pic qui représente la valeur maximale de la force de freinage. Celui-ci est plus faible sur le sable fibré-huilé (2392 N) que sur le sable concassé (2923 N) et survient significativement plus tard dans la phase d'appui (cf Figure 32). Le freinage est donc atténué et plus progressif sur le sable fibré-huilé (Crevier-Denoix et al., 2009). Le premier pic précoce de plus faible valeur visible sur la Figure 32 n'est pas visible chez tous les chevaux car il est souvent confondu avec le pic suivant. Il correspond au début de la phase de support au moment du choc initial lorsque le cheval pose son pied à plat.

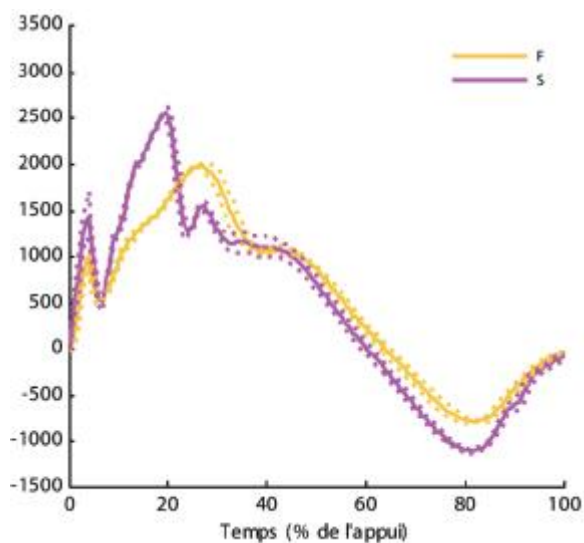


Figure 32 : Composante horizontale de la force de réaction du sol mesurée chez un cheval au trot à 9,7 m/s (35 km/h) sur deux pistes différentes (sable fibré-huilé - F, sable concassé - S).

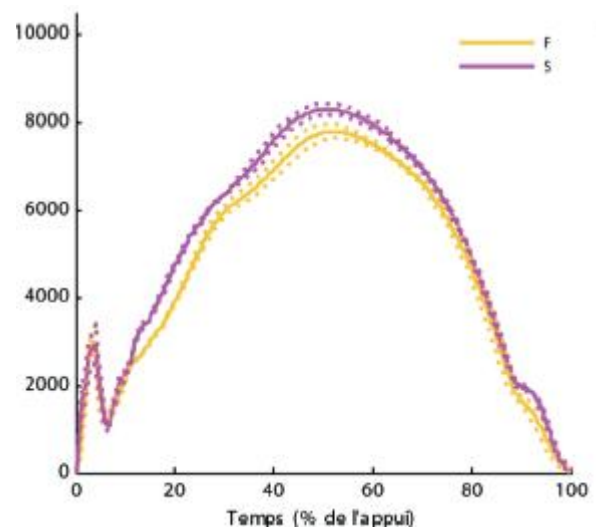


Figure 33 : Composante verticale de la force de réaction du sol mesurée chez un cheval au trot à 9,7 m/s (35 km/h) sur deux pistes différentes (sable fibré-huilé - F, sable concassé - S).

(d'après Crevier-Denoix et al., 2009)

Composante verticale :

Durant la phase de poser du pied, la composante verticale F_y augmente progressivement avec la mise en charge du pied sous le poids du cheval. Elle atteint son maximum au milieu de la phase d'appui, au soutènement, lorsque le canon est vertical (cf Figure 33). Le pic

précoce du choc initial est également visible. Quand le cheval pose en talon, ce pic est plus faible et moins différencié du reste de la courbe (Crevier-Denoix et al., 2009). L'amplitude maximale de la composante horizontale de GRF à l'impact est plus faible que celle de la composante verticale du fait du glissement longitudinal du sabot au contact du sol qui favorise une décélération horizontale plus progressive qu'en vertical (Robin et al., 2009).

- Point d'application de la résultante :

Immédiatement après le choc initial du pied avec le sol, le PZM se déplace depuis le point de contact jusqu'au niveau de l'apex de la fourchette, juste dorsalement à l'AIPD (Back, Pille, Back and Clayton, 2013, chap. 8). A cet endroit, la GRF est à l'origine d'un moment de force qui tend à provoquer l'extension de l'AIPD. En effet, les forces s'appliquant sur le centre de rotation de l'AIPD durant la phase d'appui sont considérées comme étant à l'équilibre : la somme de leur moment est donc nulle. Or la force du tendon extenseur dorsal du doigt étant négligeable lors de l'appui et le moment du poids étant nul puisque la force passe par le centre de rotation de l'AIPD, seuls deux moments interviennent : le moment du TFPD et celui dû à la GRF (Wilson et al., 2001a). Ainsi ces deux moments s'opposent de manière égale lorsque le pied se trouve en équilibre quasi-statique comme lors de la phase d'appui (cf Figure 34).

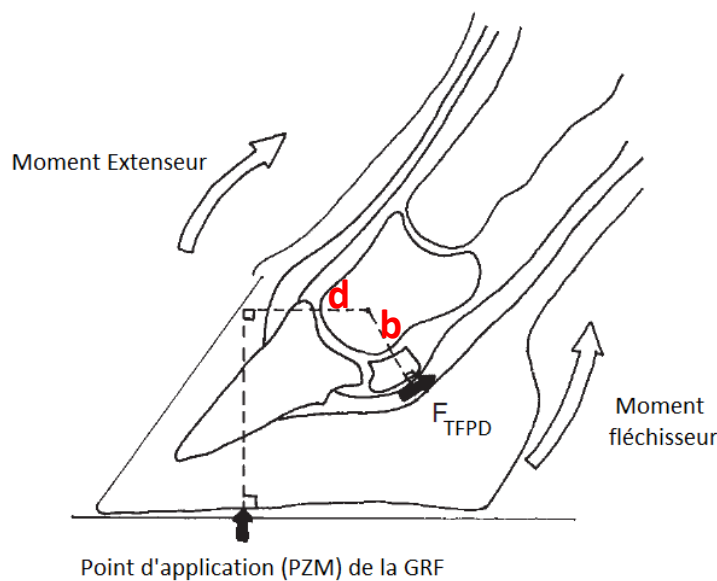


Figure 34 : Schéma des moments de force s'appliquant sur le centre de rotation de l'articulation interphalangienne distale durant l'appui. La force de réaction exercée par le sol (GRF) agit sur le *Point of Zero Moment (PZM)* et est responsable d'un moment extenseur. Celui-ci est contrebalancé par un moment fléchisseur dû à la force du tendon fléchisseur profond (F_{TFPD}). d et b sont les bras de levier respectifs de la GRF et de la F_{TFPD} .

(d'après Wilson et al, 2001)

Le théorème des moments à l'équilibre donne donc :

$$M_{ext} = M_{flech} \Leftrightarrow GRF \times d = F_{TFPD} \times b$$

M_{ext} : Moment extenseur

M_{flech} : Moment fléchisseur

Les bras de levier des forces GRF et F_{TFPD} , respectivement d et b ci-dessus, sont mesurés sur des clichés radiographiques. Leur longueur est déterminée par la forme des os sésamoïdiens proximaux pour l'AIPP et par l'os sésamoïdien distal pour l'AIPD. Ainsi ces distances sont constantes chez un cheval donné et une modification de la GRF aura donc une action sur la force exercée par le TFPD (Wilson, Weller, Ross and Dyson, 2010, chap. 26).

(3) Les forces actives

Ces forces sont dues à la contraction musculaire qui s'exprime dans le pied par l'intermédiaire des tendons fléchisseurs superficiel et profond du doigt et, dans une moindre mesure, par l'extenseur dorsal du doigt (cf Figure 35). Elles évoluent plus lentement que les forces passives au cours de la phase d'appui.

Il est possible de calculer la force exercée par le TFPD sur l'os naviculaire (Willemen et al., 1999b) : elle est proportionnelle à la tension du tendon et à l'angle de sa courbure au niveau de l'os sésamoïdien distal, déterminé à l'aide de clichés radiographiques (Wilson et al., 2001a).

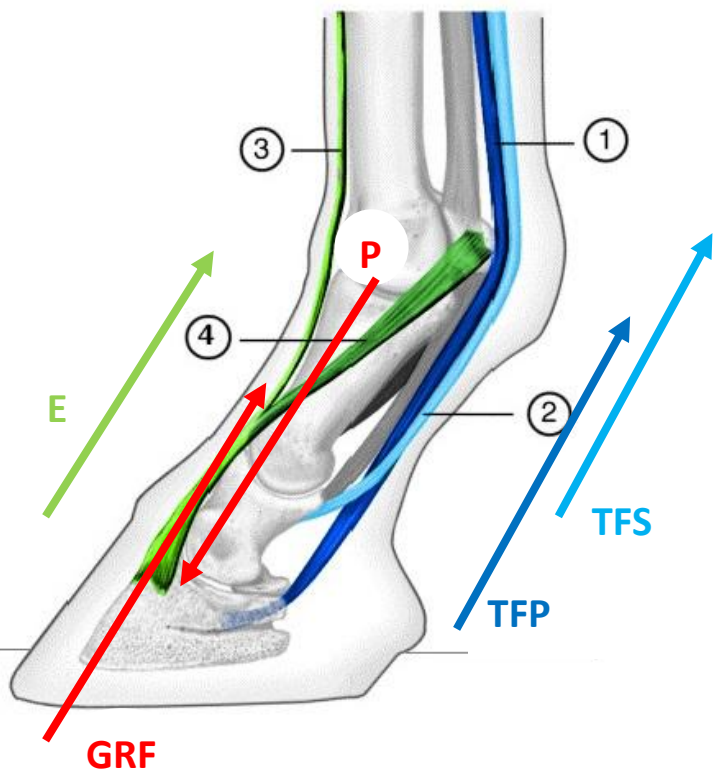
$$F_{Nav} = 2(F_{TFPD} \times \cos(\alpha/2))$$

Où F_{Nav} = force de compression exercée sur l'os naviculaire

α = angle de courbure du tendon fléchisseur profond du doigt au niveau de l'os naviculaire

Figure 35 : Schéma des forces s'exerçant dans le pied

- E : Force du tendon extenseur dorsal du doigt
 - P : force de contact avec la phalange moyenne
 - GRF : Ground Reaction Force
 - TFP : Force du tendon fléchisseur profond du doigt
 - TFS : Force du tendon fléchisseur superficiel du doigt
1. Tendon fléchisseur profond du doigt
 2. Tendon fléchisseur superficiel du doigt
 3. Tendon extenseur dorsal du doigt
 4. Bride latérale du muscle interosseux III



3. le soutènement et la propulsion

Lors du soutènement, le poids du corps est en grande majorité soutenu par le ligament suspenseur du boulet (LSB) et par le tendon fléchisseur superficiel du doigt (TFSD) qui emmagasinent de l'énergie sous forme de tension élastique. Celle-ci est ensuite libérée lors de la phase de propulsion (Denoix, 1999b). La mise en charge du membre s'effectue principalement dans le plan vertical.

En ce qui concerne la GRF, sa composante verticale continue d'augmenter progressivement jusqu'à atteindre son maximum lorsque le canon est vertical puis décroît ensuite jusqu'au décolllement du pied (cf Figure 33). Pour un cheval de 550kg lancé à 35 km/h, l'amplitude verticale maximale peut atteindre 10 000N, ce qui correspond à la force exercée par une masse d'environ une tonne soumise à la pesanteur. La force horizontale longitudinale décroît à la fin de la phase de glissement puis devient négative, c'est-à-dire que la direction de la force s'inverse : elle est alors dirigée vers l'avant, dans le sens du mouvement, ce qui correspond à une force de propulsion (cf Figure 32).

En raison de la descente du boulet lors du soutènement, la terminaison distale du TFPD se rapproche de l'horizontale, ce qui limite la pression exercée par ce tendon sur l'os naviculaire (cf Formule de la force exercée sur l'os naviculaire : F_{Nav}). Puis lors de la propulsion, la contraction des muscles fléchisseurs contribue de manière active à l'augmentation de la tension du TFPD. De plus, le poids et les forces mises en jeu lors de la propulsion ont une résultante disto-palmaire qui va augmenter la compression subit par l'os naviculaire (Denoix, 1999b). Celui-ci est alors comprimé entre le TFPD et la pression de la phalange moyenne (Denoix, 1999a). La force F_{Nav} est donc maximale au moment de la propulsion. La contraction des muscles fléchisseurs finit par soulever les talons du sol et le pied bascule autour de la pince avant de quitter le sol.

Le centre de pression (PZM) où s'exerce la force de réaction du sol se déplace vers la pince jusqu'au point dit de « breakover », à l'endroit où la pince quitte le sol. Lorsqu'il atteint la pince, le bras de levier du moment extenseur est à son maximum car il ne peut dépasser le sabot. Or le moment fléchisseur traduisant l'effet de la force du TFPD continue d'augmenter, jusqu'à ce qu'il soit plus important que le moment extenseur, provoquant la flexion de l'AIPD et le décolllement des talons du sol (Wilson, Weller, Ross and Dyson, 2010, chap. 26).

B. Fonctionnement dynamique du pied

1. Dynamique du pied

Le pied est l'interface entre le membre du cheval et le sol. Il s'agit d'une structure anatomique complexe qui entoure, supporte et protège les structures qu'il contient. Mécaniquement le pied a trois fonctions :

- L'absorption des chocs et des vibrations lorsque le membre touche le sol
- Le support du poids du corps
- La propulsion lorsque le membre quitte le sol

Ces trois fonctions sont chacune remplies par une partie bien spécifique du pied. En effet la partie caudale du pied présente un caractère plus élastique par rapport à la pince et aux quartiers, et la paroi du sabot est plus fine en talons qu'en pince ce qui favorise leur écartement lors de l'appui et accorde plus de résistance en pince pour lutter contre la force de propulsion (Back, Pille, Back and Clayton, 2013, chap. 8). Les talons sont donc spécialisés dans l'amortissement, les quartiers, la sole et la paroi du sabot dans le support du poids et la pince dans la propulsion.

Le choc du sabot sur le sol entraîne une décélération rapide du membre, reflétée par l'augmentation brutale de la GRF. Si les forces à l'impact sont moins importantes que dans le reste de la phase d'appui, elles sont appliquées très rapidement lorsque le pied entre en contact avec le sol ce qui fait que cette phase est critique dans la pathogénie des blessures (Wilson, Weller, Ross and Dyson, 2010, chap. 26). Le choc initial et le frottement du pied avec le sol sont également responsables de la génération de vibrations dont l'amplitude dépend du type de surface, de la vitesse et du poids du cheval principalement, ainsi que de la ferrure dans une moindre mesure. Le pied est particulièrement adapté à l'absorption de l'énergie générée lors de la locomotion avant que celle-ci ne soit transmise au reste du membre de par l'existence de plusieurs mécanismes d'amortissement :

- Le glissement du pied au contact du sol diminue l'amplitude de la composante horizontale de la GRF (Robin et al., 2009)
- Le mouvement possible de rotation et de translation de l'AIPD permet au sabot de s'adapter aux irrégularités du terrain (Denoix, 1999a)
- Le coussinet digital, en tant que structure fibro-cartilagineuse et élastique, est capable d'absorber les chocs (Bowker et al., 1998)
- La forme concave de la sole et l'aspect en « V » de la fourchette permettent une déformation dans le plan sagittal et transversal des talons : la sole et la fourchette ont un mouvement vers le bas et s'étirent sur les côtés.
- La phalange distale est suspendue dans la boîte cornée par la jonction lamellaire. Les composantes de la GRF sont donc transmises à la paroi du sabot par la sole et la ligne blanche puis sont en grande partie absorbées par les lamelles du kéraphylle et du podophylle (Willemen et al., 1999a). Ce système permet également l'amortissement des forces dues au poids du

cheval qui compriment la phalange distale et sont donc atténuées par la jonction lamellaire (Thomason, 1998).

Les forces appliquées au pied au cours de la phase d'appui sont responsables d'un changement de forme du sabot permettant une redistribution des contraintes subit pendant la locomotion (Davies et al., Floyd and Mansmann, 2007, chap. 3). Les deux forces principales à l'origine de la déformation du sabot sont la GRF et le poids du corps du cheval transmis par la troisième phalange à la jonction lamellaire (Thomason, 1998). Celui-ci est en grande partie amorti par la descente du boulet mais est transmis dans une moindre mesure à la phalange distale qui réalise alors un mouvement disto-palmaire au moment de l'appui, entraînant la paroi dorsale du sabot avec elle, via la jonction entre les lamelles dermales et épidermiques (Thomason, 1998). L'appareil suspenseur de la troisième phalange apparaît comme un « trampoline » contrebalançant l'effet du poids du cheval sur le pied. Ce déplacement distal de la paroi, plus marqué dans sa partie proximale, vient comprimer le bourrelet coronaire.

Associé à ce mouvement de la partie dorsale de la paroi du sabot, la partie palmaire du pied réalise une translation abaxiale vers les côtés (cf Figure 36). Le mécanisme exact du déplacement des talons a fait l'objet de nombreux débats. La théorie de la pression supposait que la fourchette entre en contact avec le sol et transmette l'effort au coussinet digital qui réaliserait l'expansion des talons (Dyhre-Poulsen et al., 1994). Selon la théorie de la dépression, l'écartement des talons serait provoqué par la descente distale de la

Figure 36 : Schéma de la déformation et du mouvement du sabot et de la phalange distale lors de la phase d'appui. La ligne rouge représente la position du sabot lors du support du poids du cheval

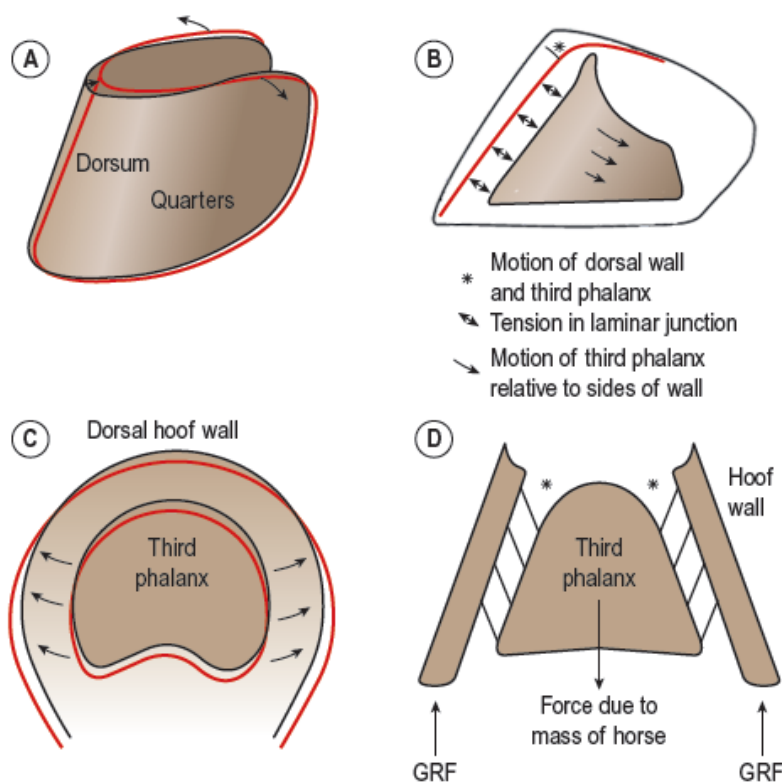
A : Vue dorsolatérale

B : Vue latérale, le déplacement dorso-palmaire de la 3^{ème} phalange provoque la mise en tension de la jonction lamellaire et de ce fait le déplacement de la paroi dorsale du sabot, notamment dans sa partie proximale

C : Vue transversale, les flèches mettent en évidence le mouvement relatif des côtés de la paroi par rapport à la 3^{ème} phalange

D : Vue frontale, la suspension de la phalange distale dans la boîte cornée (*) est à l'origine de tension au sein de la jonction lamellaire

(Back, Pille, Back and Clayton, 2013, chap. 8, p156)



deuxième phalange et le mouvement de la paroi dorsale du sabot lors de l'appui. En effet l'influence de la charge de la fourchette sur l'écartement des talons n'a pas été prouvé même si l'écartement est plus important lorsque la fourchette est en contact avec le sol (Roepstorff et al., 2001). Ce n'est donc pas l'écrasement de la fourchette qui provoque l'écartement des talons mais l'écartement des talons qui induit l'expansion transversale de la fourchette. De plus la pression dans le coussinet digital diminue au cours de l'appui, traduisant ainsi un écartement des talons sans contrainte exercée sur le coussinet (Dyhre-Poulsen et al., 1994). La deuxième théorie semble donc l'emporter.

Quel que soit le mécanisme d'expansion des talons, ce mouvement est primordial. En effet, la capacité d'une structure à se déformer lorsqu'elle subit une pression puis à revenir à son état initial lorsque celle-ci est retirée est un élément déterminant de l'amortissement des chocs. Cette structure élastique va être capable d'absorber de l'énergie puis de la transmettre par la suite (Wilson, Weller, Ross and Dyson, 2010, chap. 26). Les tissus mous tels que les tendons fléchisseurs, les ligaments ou le coussinet digital sont capables d'emmagasiner une quantité considérable d'énergie puis de la restituer lors de la propulsion. En effet l'expansion des talons a lieu durant 70% de la phase d'appui, puis lors de la propulsion, lorsque les talons quittent le sol, ils se resserrent avant de retourner à leur position de repos, libérant l'énergie emmagasinée (Roepstorff et al., 2001).

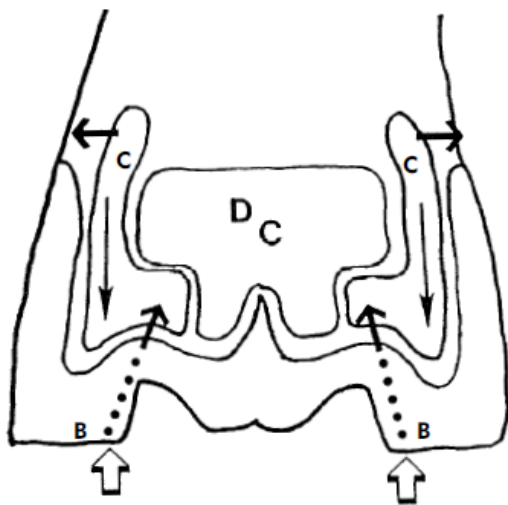


Figure 37 : Schéma de l'hémodynamique du pied. Les barres appuient sur la saillie axiale de la face interne des cartilages, provoquant leur rotation abaxiale. Ce mouvement est à l'origine de la pression négative enregistrée dans le coussinet digital.

B : Barres
DC : Coussinet digital
C : Cartilages unguiaux

(d'après Bowker et al., 1998)

Le Dr Bowker a développé une théorie selon laquelle la dissipation de l'énergie est réalisée par l'intermédiaire d'un flux sanguin rapide à travers un réseau d'anastomoses important présent dans les cartilages unguiaux (Bowker et al., 1998). En effet les cartilages latéraux sont traversés par de nombreuses anastomoses veineuses reliant le plexus coronaire de leur face latérale, au plexus solaire de leur face médiale. Ces vaisseaux de faible diamètre vont augmenter la distance à parcourir pour le flux sanguin lors du retour veineux grâce à ces ramifications, augmentant les frottements visqueux avec la paroi. Ceux-ci sont plus importants lorsque la vitesse d'écoulement du flux sanguin, dépendant du gradient de

pression local, est rapide. Par conséquent, un gradient de pression tel que celui généré lors de la phase d'impact est susceptible de provoquer l'augmentation des frottements visqueux entre le sang et la paroi des vaisseaux. Cet effet est encore renforcé par le faible diamètre de ces capillaires. L'énergie de l'impact est ainsi éliminée par la résistance hydraulique du système vasculaire.

Le flux sanguin est orienté par le mouvement abaxial des cartilages unguulaires. En effet il semble que la saillie axiale de la face interne des cartilages se superpose aux barres du sabot : lors de l'appui, les barres et le mouvement de la phalange moyenne provoquent un déplacement abaxial de ces structures fibrocartilagineuses (cf Figure 37). Cette expansion est à l'origine de la pression négative observée au sein du coussinet digital. Cette pression permet le remplissage rapide des vaisseaux de la partie palmaire du pied à partir du plexus solaire avant le nouvel impact, assurant ainsi la pérennité du système hémodynamique du pied. Presque simultanément à ce mouvement abaxial, la pression de l'impact force le flux veineux à traverser les anastomoses veineuses à travers les cartilages, où la résistance hydraulique des micro-vaisseaux dissipe l'énergie. L'absence de valvules dans les vaisseaux profond du pied favorise l'évacuation rapide du sang dans toutes les directions possibles. En revanche la présence de valvules dans les veines caudales superficielles du sabot et dans les veines digitales propres palmaires empêche le flux sanguin rétrograde vers le pied et assure ainsi un retour veineux efficace (Pollitt, 2010).

Plus le cartilage est épais, plus le réseau veineux est important et donc plus l'énergie est dissipée (Bowker et al., 1998). Il semble de plus que des cartilages développés soient associés avec un coussinet digital composé de tissu fibrocartilagineux élastique plutôt que de tissu adipeux, plus efficace dans l'absorption d'une partie de l'énergie. A l'inverse, des cartilages unguulaires fins ne s'étendent pas suffisamment axialement au dessus des barres, ne recouvrent pas totalement les anastomoses veineuses et sont associés à un coussinet digital composé majoritairement de tissu adipeux : le système hémodynamique n'est pas efficace dans ces conditions. Même si la génétique prédispose à avoir un coussinet plus fibrocartilagineux, ces tissus conjonctifs se développent et s'adaptent en réponse aux stimuli de l'environnement : le poids du cheval, les forces à l'impact, l'âge...

Ainsi le pied est à la fois une pompe hydraulique qui renvoie le sang vers le cœur et un amortisseur hydro-pneumatique lors de l'impact au sol grâce à un dispositif « trois en un » (cf **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) :

- Ralentissement du débit sanguin au niveau de la couronne par la compression du bourrelet coronaire et donc des vaisseaux sanguins contenus dans la boîte cornée. Ce système permet de maintenir le sang sous pression dans le pied.
- Résistance hydraulique des vaisseaux sanguins au passage du sang. Les frottements visqueux permettent d'éliminer une partie de l'énergie de l'impact sous forme de chaleur.

- Résistance élastique de la boîte cornée et de ses constituants (coussinet digital, tendons, ligaments) qui emmagasinent une partie de l'énergie par leur distorsion avant de la restituer par le retour à leur position initiale.

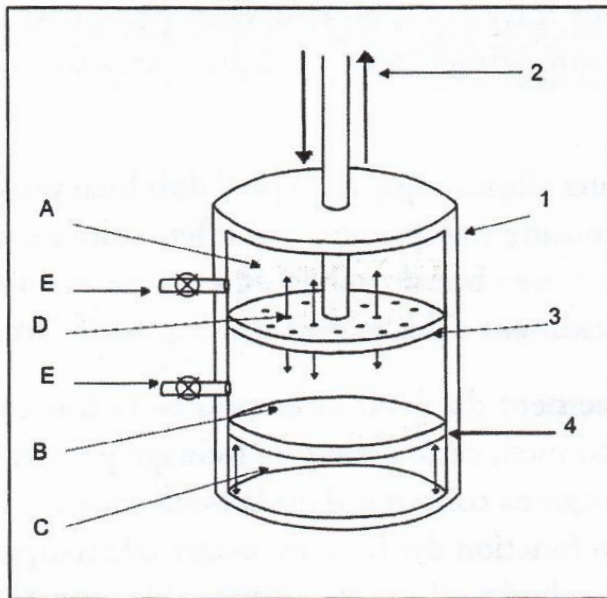


Figure 38 : Fonctionnement du sabot en temps qu'amortisseur hydronumérique

1. Cylindre étanche : boîte cornée
 2. Tige mobile : action des barres
 3. Piston lié à la tige : cartilages ungulaires
 4. Piston libre : expansion abaxiale de la boîte cornée sous l'effet du poids du cheval
- A. Compartiment hydraulique supérieur : plexus solaire
 B. Compartiment hydraulique inférieur : plexus coronaire
 C. Compartiment pneumatique : capacité de déformation de la boîte cornée

(d'après Vanschepdael, 2011)

2. Le rôle sensitif du pied

L'innervation du pied est également cruciale pour le cheval car elle le renseigne sur son interaction avec l'environnement : le toucher, la pression, la proprioception et la nociception sont les informations relayées par les nerfs palmaires digitaux propres. Ces nerfs sont constitués à la fois de fibres myélinisées, rapides, et de fibres non myélinisées, plus lentes, avec un rapport d'environ 1 pour 4. Si le rôle prépondérant des nerfs digitaux palmaires est un rôle afférent de l'information sensorielle, la présence de fibres efférentes sympathiques (25% des fibres non myélinisées, (Wilson, Weller, Ross and Dyson, 2010, chap. 26)) suggère une intervention de l'activité nerveuse dans l'adaptation du cheval aux contraintes subies par le sabot (Bowker et al., 1995). En effet leur stimulation est suivie par le relargage de peptides au niveau local dont l'action modifie la physiologie des différentes structures du pied (vaisseaux, articulations, tissus mous...) et intervient notamment dans la régulation du flux sanguin (vasoconstriction/vasodilatation) et la formation d'œdèmes.

Les récepteurs sensoriels sont majoritairement situés en deux zones : dans la partie palmaire/plantaire de la fourchette et au sein des ligaments sésamoïdiens collatéraux proximement à l'os naviculaire (Bowker et al., 1995, 1993a). Ces deux positions sont respectivement distale et proximale aux structures amortissantes du pied (coussinet, fourchette, cartilages...) et de ce fait, les stimuli reçus par chacune de ces zones seront différents, les forces mesurées étant plus ou moins atténuées par le mécanisme de

dissipation de l'énergie en fonction de la position des récepteurs. La comparaison des stimuli sensoriels reçus par chaque zone permet une évaluation neuro-physiologique des forces appliquées au pied et du bon fonctionnement de leur amortissement. Ceci fournit par la suite un moyen de contrôler l'interaction physiologique du pied avec son environnement via les fibres efférentes sympathiques.

C. Contraintes ostéo-articulaires

1. Surfaces articulaires au contact

L'anatomie fonctionnelle de l'AIPD est conditionnée par la forme de ses surfaces condyliques. Les mouvements prépondérants sont la flexion et l'extension.

Durant les phases d'amortissement et de soutènement, on assiste à une flexion de l'AIPD, accompagnée d'une hyper-extension de l'articulation métacarpo-phalangienne mettant en tension le LSB et le TFSD. Ainsi le boulet descend tandis que le paturon s'horizontalise. (denoix 1994) Pour des charges modérées, mises en jeu lors du trot ou du petit galop, l'os naviculaire répond de toute sa hauteur à la face palmaire de la phalange moyenne. La répartition des forces est donc maximale (Denoix, 1999b). Mais pour des charges plus importantes telles que celles mises en jeu lors du galop rapide en terrain dur, la flexion plus importante de l'AIPD entraîne le glissement dorso-distal de la partie palmaire de la surface articulaire distale de la phalange moyenne, limitant ainsi le contact avec l'os naviculaire au bord distal de sa surface articulaire (Denoix, 1999a).

Ainsi durant les phases d'amortissement et de support, les pressions sont concentrées sur les deux dernières phalanges et sollicitent moins l'appareil podotrochléaire. La Figure 39 schématise les contraintes subies par la phalange distale au cours de ces phases. D'une certaine manière, la composante verticale de la traction de la phalange distale réalisée par les lamelles et la pression exercée par les structures palmaires du pied se compensent : elles s'opposent toutes deux au poids du cheval et une augmentation de l'une entraîne la diminution de l'autre (Davies et al., Floyd and Mansmann, 2007, chap. 3). Ce principe est d'ailleurs utilisé pour le traitement orthopédique de la fourbure où l'ajout de mousse au niveau de la sole ou de fers en cœur, augmente la compression de la face solaire de la 3^{ème} phalange par la sole et par conséquent limite la tension au niveau de la jonction lamellaire.

Durant la phase de propulsion, l'extension de l'AIPD augmente la surface de contact entre la phalange moyenne et l'os naviculaire et diminue les zones d'affrontement entre les deux dernières phalanges (Denoix, 1999a). Il y a donc moins de pression entre ces deux os. En revanche, les forces mises en jeu lors de la phase de propulsion ont une résultante à direction disto-palmaire mettant fortement à contribution l'os naviculaire (Denoix, 1999b). Celui-ci est coincé entre la pression exercée par la phalange moyenne et la tension exercée par le TFPD.

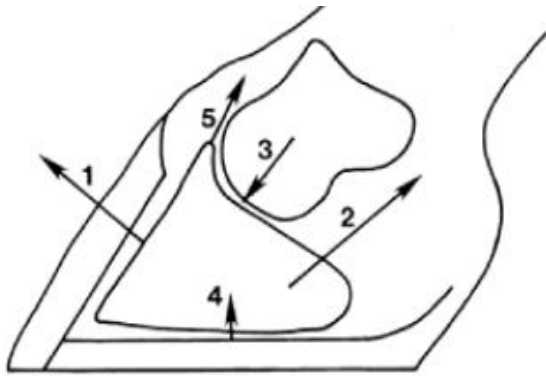


Figure 39 : Contraintes subies par la phalange distale au cours des phases d'amortissement et de support

1. Tension exercée par la jonction lamellaire entre la paroi du sabot et la phalange distale
2. Tension exercée par le TFPD et poussée proximale de l'os naviculaire
3. Compression exercée par la phalange moyenne du fait du poids du corps
4. Poussée proximale exercée par la sole, la fourchette et les talons en réponse à la réaction du sol
5. Tension exercée par le tendon extenseur commun du doigt et les branches du LSB.

d'après (Stashak, 2002)

Des modifications de la mécanique du pied sont également présentes dans le plan frontal afin de s'adapter aux irrégularités du sol. En effet un appui médial du pied entraîne (Denoix, 1999b) :

- une rotation latérale de l'AIPD,
- un glissement médial de la troisième phalange et de l'os naviculaire par rapport à la deuxième phalange (qui correspond à un déplacement latéral de la phalange moyenne sur la surface articulaire de la phalange distale),
- une collatéromotion médiale (l'espace cartilagineux est comprimé latéralement et s'ouvre médialement).

2. Structures ligamentaires et tendineuses

Au repos le TFPD joue un rôle important dans la stabilisation des articulations IPP et IPD en contrebalançant la tension du tendon extenseur dorsal du doigt. Le LSB et le TFSD agissent de concert pour s'opposer à l'affaissement du boulet pendant la phase d'appui, le LSB limitant l'hyper-extension métacarpo-phalangienne et le TFSD la flexion de l'AIPP.

Au cours des phases d'amortissement et de soutien, le centre des pressions exercées sur le pied par le sol est en avant du centre de rotation de l'AIPD, ce qui tend à provoquer son extension. La contraction du muscle fléchisseur profond du doigt permet de contrebalancer la réaction du sol et évite l'hyper-extension de l'AIPD. En raison de la descente du boulet, la partie distale du TFPD se rapproche de l'horizontale : la tension exercée sur l'os naviculaire est donc relativement faible (Denoix, 1999b). En revanche, la tension du TFSD et du LSB est maximale et limite l'affaissement du boulet. D'autre part, les ligaments sésamoïdiens collatéraux sont relâchés du fait de la flexion de l'AIPP. La tension

du tendon extenseur dorsal du doigt, aidé par les brides du LSB, permet la stabilité de l'AIPD en maintenant la phalange distale contre la phalange moyenne.

Lors de la dernière partie de la phase d'appui, la contraction active du muscle fléchisseur profond du doigt, associé à la restitution de l'énergie élastique accumulée par son tendon, provoquent l'extension de l'AIPD. Durant cette phase de propulsion, le TFPD s'appuie sur le scutum distal (*facies flexoria*) et vient en contact étroit avec l'os naviculaire (Denoix, 1994). L'amplitude de la tension du tendon est alors maximale (Willemen et al., 1999b; Wilson et al., 2001a). Parallèlement à l'augmentation de la tension du tendon, la verticalisation de sa partie distale et la fermeture de son angle de réflexion sur la *facies flexoria* accroissent considérablement les pressions exercées par le TFPD sur l'os sésamoïdien distal (cf Figure 40).

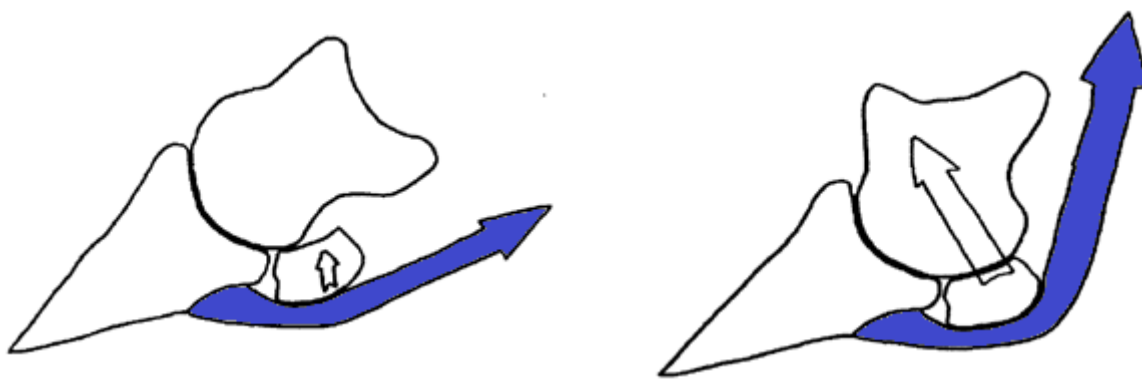


Figure 40 : Contraintes exercées sur l'os naviculaire lors de l'amortissement (à gauche) et de la propulsion (à droite). La flèche bleue représente la tension au sein du tendon fléchisseur superficiel profond du doigt (TFPD) et la flèche blanche représente la compression exercée sur l'os naviculaire par le TFPD, plus importante lors de la propulsion. (d'après Denoix 1994)

Les ligaments sésamoïdiens collatéraux ont deux principales fonctions : ils assurent la stabilisation de l'articulation de l'os naviculaire avec la phalange moyenne et ils assistent les brides du LSB rattachées à l'extenseur dorsal du doigt dans la lutte contre la flexion de l'AIPP (Ratzlaff and White, 1989). Ils sont relâchés durant le support normal du pied et mis sous tension par l'extension de l'AIPD lors de la propulsion (cf Figure 41).

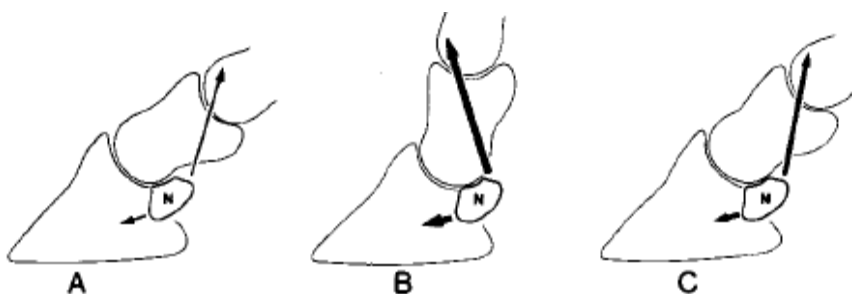


Figure 41 : Tension des ligaments sésamoïdiens collatéraux et distal impair lors des phases de support (A), de propulsion (B) et lors de la phase de support avec une flexion anormale de l'AIPP (C)

(d'après Ratzlaff & White, 1989)

II. Considérations biomécaniques du syndrome podotrochléaire

A. Influences de la forme de l'os sésamoïdien distal

1. Rôles biomécaniques de l'os naviculaire

L'os sésamoïdien distal s'articule avec les phalanges moyenne et distale. Son rôle biomécanique est multiple (Ratzlaff and White, 1989):

- Il protège le TFPD qui passe sur la surface lisse de la *facies flexoria* de l'os
- Il augmente la surface d'insertion du tendon sur la phalange distale, permettant ainsi une meilleure répartition des charges
- Il maintient un angle constant d'insertion du tendon, ce qui permet d'éviter les modifications délétères de l'orientation des fibres lors des mouvements de l'AIPD
- Il agit comme un levier permettant de faciliter la rotation du pied et le soulèvement des talons à la fin de la phase d'appui en potentialisant la force du TFPD.

2. Forme de l'os naviculaire et localisation des lésions

Une étude a prouvé l'influence de la forme géométrique du bord proximal de l'os naviculaire : les grades radiologiques sévères du syndrome podotrochléaire sont associés à une forme concave ou ondulée du bord articulaire proximal de l'os (Dik and van den Broek, 1995). Cela s'explique par le fait que la forme de l'os influe sur la répartition des forces exercées dans le pied. Cependant la morphologie de l'os, si elle semble fondamentale dans la pathogénie de la maladie naviculaire, n'est pas la seule condition du développement du syndrome comme le montre l'augmentation de la prévalence des grades radiologiques sévères chez les vieux chevaux présentant des formes de l'os moins vulnérables (convexe ou droite) : l'âge et le travail apparaissent également comme des éléments importants dans la pathogénie (Dik et al., 2001).

La conformation de l'os naviculaire est également impliquée dans la localisation des lésions dégénératives primaires observées avec l'âge ou en début de syndrome podotrochléaire. En effet la crête sagittale de la face palmaire de l'os naviculaire présente deux surfaces convexes, la distale étant plus large que la proximale. Or la force de traction (T) s'exerçant dans le TFPD provoque une force normale qui s'applique sur la face palmaire de l'os. Le montant de cette force (N) est inversement proportionnel à la courbure de la surface (r) : $N=T/r$. Elle est donc plus importante, pour une même tension T, lorsque le rayon de courbure r est faible, c'est-à-dire sur le bord distal puis sur le bord proximal par rapport au reste de l'os (K. N. Thompson, 1991; Pool et al., 1989).

B. Influence du poser en pince

Une étude a montrée que si l'amplitude des forces mises en jeu au moment du départ du pied des chevaux naviculaires était comparable à celle des chevaux sains, la force de tension du TFPD était en revanche presque doublée au début de la phase d'appui (Wilson et al., 2001a). Les chevaux atteints du syndrome podotrochléaire posent majoritairement le pied en pince, ce qui a pour conséquence de déplacer dorsalement le PZM et donc d'augmenter le moment d'extension de l'AIPD (Wilson et al., 2001a). En appliquant le théorème des moments (cf I.A.2.c), on peut voir que cette augmentation du moment d'extension résulte en l'amplification de la tension s'exerçant au sein du TFPD. De manière biomécanique on explique cette valeur plus importante de la tension du TFPD par le fait que chez les chevaux ayant un poser normal en talons, l'AIPD tourne dans le sens contraire des aiguilles d'une montre lorsque le pied rencontre le sol, provoquant une diminution de la tension du TFPD, alors que dans le même temps, l'articulation métacarpo-phalangienne tourne dans le sens horaire lors de la descente du boulet, provoquant une augmentation de la tension du TFPD : la tension finale du TFPD est alors équilibrée (cf Figure 42). Au contraire chez les chevaux posant en pince, l'AIPD tourne dans le sens des aiguilles d'une montre et ne contrebalance plus l'effet de la rotation horaire de l'articulation métacarpo-phalangienne : la tension du TFPD est donc augmentée (K. N. Thompson, 1991; Williams, 2001).

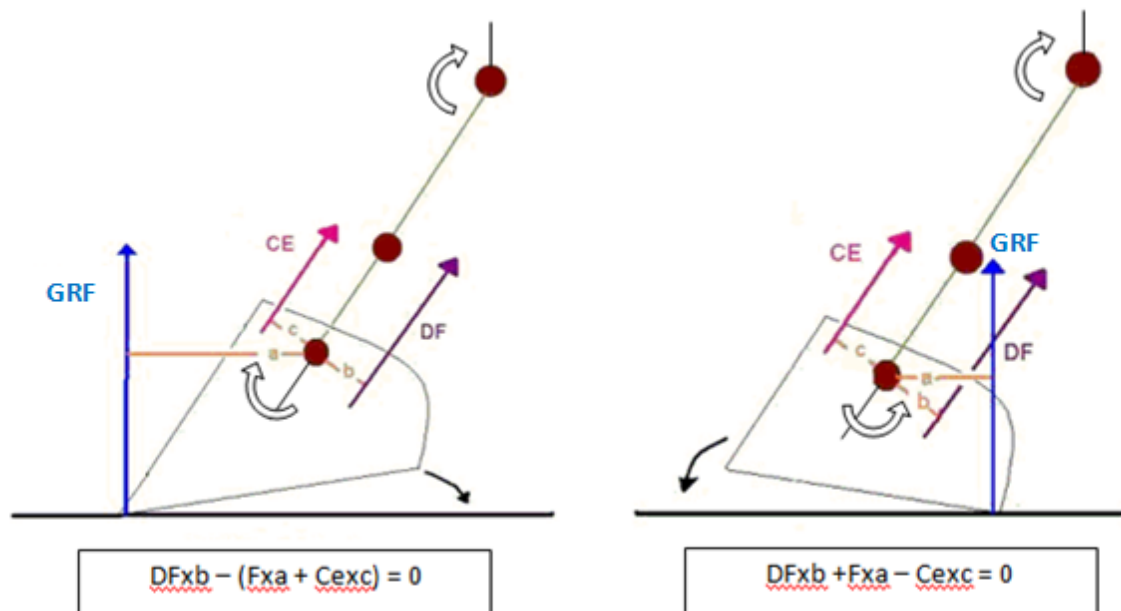


Figure 42 : Schéma des forces s'appliquant sur la phalange distale lorsque le cheval pose le pied en pince (à gauche) ou en talons (à droite).

CE : Force du tendon extenseur commun du doigt

DF : Force du TFPD

GRF : Force de réaction du sol

a, b, c : bras de levier respectifs de la GRF, de DF et de CE.

Ainsi la tension du TFPD est plus importante lorsque le cheval pose en pince et par conséquent les frictions exercées par le tendon sur la *facies flexoria* de l'os naviculaire, notamment sur les crêtes distales et proximales, sont également plus importantes (K. N. Thompson, 1991; Wilson et al., 2001a). L'augmentation des forces compressives de l'os naviculaire au début de la phase d'appui serait suffisamment importante pour dépasser le seuil de stress de l'os naviculaire et donc être responsable des érosions du fibrocartilage de la face palmaire de l'os observées lors de syndrome naviculaire (Wilson et al., 2001a). D'autre part, les actions du TFPD dépendent d'une part de la contraction active du muscle et d'autre part de la tension passive de la bride carpienne. Cette dernière dépendant de l'angle des articulations IPD et MCP et donc principalement de la conformation du pied (cf ci-dessous), il semble que l'augmentation de la tension du TFPD serait générée par la contraction active du muscle fléchisseur profond du doigt. Ainsi selon Wilson, le poser en pince serait généré par une contraction active volontaire de la part du cheval qui souhaiterait éviter une douleur en talons. Le poser en pince interviendrait donc dans l'étiologie du syndrome naviculaire mais en tant que facteur aggravant suite à une douleur primaire en talons. Cependant certains chevaux sont contraints par leur discipline sportive à poser en pince, sans qu'il y ait forcément d'atteinte primaire en talons : c'est le cas par exemple des chevaux de CSO à la réception des sauts, ce qui pourrait expliquer la forte prévalence de chevaux naviculaires au sein de cette filière sportive (Ratzlaff and White, 1989).

D'autre part, certaines études suggèrent que le poser en pince serait responsable de la diminution de l'irrigation de l'os sésamoïdien distal en augmentant la tension des LSCs et du LSDI au travers desquels passent les vaisseaux irriguant l'os (Bowker, 2003; Ratzlaff and White, 1989). Ici encore ce symptôme serait décrit comme un facteur prédisposant à développer le syndrome podotrochléaire.

Cependant certains auteurs considèrent que les adhérences entre le TFPD et l'os naviculaire en phase avancée du syndrome podotrochléaire peuvent être responsables d'une gêne mécanique et empêcher la modification de la foulée même après anesthésie du pied : le poser en pince est alors une conséquence et non une cause de maladie naviculaire (Stashak, 2002).

Ces considérations biomécaniques vont conditionner le parage et le ferrage afin de rétablir un poser en talons correct et de favoriser le développement des structures amortissantes du pied.

C. Influence de la conformation du pied

1. Conformation talons bas/pince longue (« Long toe-low heel »)

La conformation « bas-jointé » se traduit par une obliquité plus marquée du paturon et un excès de descente du boulet causée par une hyper-extension de l'articulation MCP. Elle s'accompagne d'une pince longue et de talons bas avec parfois un axe pied-paturon brisé vers l'arrière, et est aggravée par un paturon long jointé.

Avec cette conformation, le sabot a tendance à pousser vers l'avant et non pas vers le bas : la croissance de la pince est très importante et les talons deviennent « fuyants », c'est-à-dire que les tubules de la paroi deviennent parallèles au sol et n'assurent plus leur fonction de support du poids. L'angle du sabot est alors plus faible en talons qu'en pince, alors qu'ils sont sensiblement égaux normalement, et l'angle solaire de la phalange distale diminue, se rapprochant de la sole jusqu'à avoir un pied plat voire même une phalange basculée vers l'arrière (Eliashar et al., 2004).

Tous ces éléments tendent à déplacer le centre de pression statique (ou PZM) vers l'avant, ce qui augmente le bras de levier de la GRF sur l'AIPD, et retarde l'instant où le pied quitte le sol. Ainsi la force de tension du TFPD nécessaire à la flexion de l'AIPD au moment du départ du pied est plus importante du fait de l'augmentation du bras de levier par la croissance excessive en pince et par conséquent la force de friction exercée sur l'os naviculaire par le TFPD est augmentée : une diminution d'un degré de l'angle solaire de la phalange distale entraîne une augmentation de 20% de la force exercée par le TFPD sur l'os naviculaire (Eliashar et al., 2004). Ces chevaux ont également tendance à poser le pied en pince, ce qui peut provoquer des effets délétères à long terme sur l'os naviculaire, comme expliqué précédemment.

Les chevaux présentant une conformation bas jointée sont donc prédisposés au syndrome naviculaire, particulièrement les formes tendineuses et ligamentaires, ainsi qu'aux douleurs chroniques en talons du fait des tensions excessives subies par les tissus mous de l'arrière du pied et de la perte de la fonction de support du poids des talons.

2. Conformation droit jointé

Les chevaux ayant un aplomb droit jointé présentent un paturon droit, très vertical et souvent court jointé, une pince courte, et parfois des talons légèrement relevés (Stashak, 2002). L'angle dorsal du sabot est plus grand que la normale ($> 50^{\circ}$ - 55°). On peut observer un défaut de descente du boulet à l'appui lié à une limitation de l'extension de l'articulation MCP. Lorsque le défaut d'extension est plus marqué on parle de « bouleture » : cette affection touche principalement les poulains, elle est due à une contracture du TFSD (Lose, 1995).

Le défaut de descente du boulet diminue l'efficacité de l'amortissement du poids du corps au cours de la foulée. Par ailleurs la pince étant courte, le pied quitte rapidement le sol et réalise de petites foulées, rendant la démarche heurtée et inconfortable. Les commotions

du pied contre le sol retentissent alors fortement sur l'ensemble des parties du membre et notamment sur les structures osseuses comme l'os naviculaire. Enfin, la paroi étant plus rigide à mesure que l'on s'éloigne du bord coronaire, un pied avec des talons hauts aura moins d'expansion de l'arrière du pied et donc une moins bonne hémodynamique (Turner, 1986). Ce type de conformation est souvent retrouvé lors de maladie naviculaire car celle-ci provoque une douleur en talons qui contraint le cheval à reporter son poids et poser en pince et afin de moins utiliser les talons. On entre dans un cercle vicieux car ceux-ci vont s'atrophier (on parle alors de « talons encastelés ») et seront donc moins aptes à remplir leur fonction d'amortissement des chocs, aggravant la douleur en talons (Wilson et al., 2001a).

3. Conformation « Axe pied-pâturon brisé vers l'avant »

Un cheval avec une pince courte ainsi que des talons hauts et verticaux présente un axe pied-pâturon brisé vers l'avant : le pied est qualifié de « pied bot ». Chez les poulains, le pied bot est dû à une contracture du TFPD qui entraîne un défaut d'extension de l'AIPD et peut être très marqué avec un pied reposant seulement sur sa pince : on parle alors de « pied pinçard ». Chez les chevaux âgés, cette anomalie d'aplomb est due à une faiblesse de l'appareil suspenseur qui cause une hyper-extension du boulet.

Cette conformation augmente l'angle solaire de la phalange distale, et le pied frappe donc le sol talons en premier mais avec une force exagérée. Ici encore les commotions provoquées par le contact du pied avec le sol seront mal atténuées et donc transmises aux structures osseuses telles que l'os naviculaire. Par ailleurs il y a plus de pression sur les talons car le centre de pression statique recule et l'appareil suspenseur est mis en tension. Le TFPD est en revanche relâché. Cependant, lorsque la contracture du TFPD est la cause primaire du pied bot, la tension au sein de ce tendon est plus importante et se répercute sur l'os naviculaire : selon Lose, la contracture du TFPD pourrait intervenir dans l'étiologie du syndrome naviculaire (Lose, 1995).

Ainsi la conformation du pied est un paramètre important à prendre en compte dans l'évaluation d'un cheval afin d'envisager les structures pouvant être atteintes à long terme à cause des déséquilibres occasionnés par le défaut d'aplomb observé. Ces anomalies devront faire l'objet de la mise en place de mesures prophylactiques ou thérapeutiques par la suite.

D. Influence du parage et de la ferrure

Les défauts de parage et de ferrure, s'ils ne suffisent pas à engendrer un syndrome naviculaire à eux seuls, sont des facteurs favorisant les commotions et les tensions exercées sur l'appareil podotrochléaire. Ils peuvent provoquer une mauvaise conformation du pied, des déséquilibres, augmenter la pression sur des zones douloureuses ou atrophiées et affaiblir les différentes structures de pied.

Il ne s'agit pas ici de mettre en évidence les bonnes pratiques de parage mais simplement de rappeler l'importance de rétablir un bon équilibre du pied afin d'éviter des tensions trop importantes dans la région naviculaire. L'intervalle entre deux parages est également un point crucial. En effet le PZM change de position entre deux parages : il convient donc de connaître la période optimale séparant les soins du pied afin d'éviter que le centre de pression statique ne soit trop modifié (Van Heel et al., 2005). Le risque de ne pas réaliser un parage régulier est d'avoir une croissance excessive de la pince et donc de rajouter de la pression sur l'os naviculaire au moment du départ du pied. Il semblerait que le cheval ferré pourrait compenser dans une certaine mesure le déplacement du PZM pour un délai n'excédant pas 8 semaines en modifiant la cinématique, c'est-à-dire le placement du membre et le timing des temps de la foulée. Cette compensation est plus forte sur les postérieurs que sur les antérieurs. Ces changements de forme du sabot ne peuvent en revanche être compensés par la modification de la surface portante étant donné que le fer change peu de taille et de forme durant cet intervalle. Au-delà de 8 semaines, le cheval ne compense plus et la conformation du pied va changer brutalement (Van Heel et al., 2005).

La force exercée par le TFPD sur l'os naviculaire est augmentée de 14% chez un cheval ferré par rapport à un cheval pied nus (Willemen et al., 1999b). La ferrure amplifie à la fois l'amplitude maximale et la fréquence des vibrations causée par la locomotion. Cependant cette différence est rapidement atténuée par les structures du pied et n'est plus sensible au niveau de l'articulation MCP.

Qui plus est, le fer empêche l'extension des talons dans les plans sagittal et transversal, diminuant ainsi l'efficacité du système d'amortissement des chocs et l'adaptation du sabot aux irrégularités du terrain (Dyhre-Poulsen et al., 1994; Van Heel et al., 2005).

La cause du syndrome podotrochléaire peut difficilement être reliée à une unique localisation anatomique ou à un seul élément à risque. En effet, il est acquis que de nombreux facteurs biomécaniques interagissent et modifient les relations entre les structures de l'appareil naviculaire ce qui complique la définition d'un mécanisme simple et unique à l'origine de l'affection. Ainsi, lors de la mise en place des mesures correctives que nous allons étudier ci-dessous, il faudra tenir compte de la forme de l'os naviculaire et de la conformation du cheval (poser du pied, forme du sabot, parage, ferrure...) pour essayer de mettre en évidence un mécanisme pathologique ayant pu ou pouvant le conduire à déclarer la maladie.

III. Traitement orthopédique du syndrome podotrochléaire

A. Principes du traitement orthopédique

La ferrure orthopédique est une des méthodes les plus communes de prise en charge de la maladie naviculaire parce qu'elle est reconnue comme étant un pilier fondamental du traitement. Etant donné la complexité de la pathogénie de la maladie naviculaire, il est évident qu'il n'existe pas de traitement universel une fois le diagnostic établi : chaque cheval doit alors faire l'objet d'une prescription individuelle en appliquant les grands principes orthopédiques qui ont su faire leurs preuves.

L'objectif principal recherché dans le cadre du traitement orthopédique d'un cheval naviculaire est la réduction de la pression exercée par le TFPD sur l'os sésamoïdien distal. Pour ce faire, les manipulations communément réalisées dans la prise en charge de la maladie naviculaire sont le raccourcissement de la pince, l'élévation de l'angle de la paroi dorsale du sabot, l'amplification de la surface d'appui au sol afin de mieux répartir les forces (Turner, 1989). En outre, la majorité des chevaux naviculaires présentent des pieds déséquilibrés avec une inégale répartition du poids, ce qui contribue à l'exercice de stimulus délétères sur la région naviculaire : il faut donc tenir compte des défauts d'aplombs au moment du parage pour espérer obtenir un succès thérapeutique. Enfin la ferrure doit également prendre en considération les symptômes exprimés par le cheval lors de son utilisation pour le type de travail effectué et lors de l'examen orthopédique : un cheval dont la boiterie est aggravée sur le cercle à main correspondante aura besoin d'un fer facilitant le départ du pied en mamelle externe et à l'inverse, lorsque la boiterie est aggravée à main controlatérale, le fer sera biseauté en mamelle interne (Denoix, 2002b).

L'approche la plus efficace consiste à traiter chaque cas individuellement en suivant plusieurs grands principes (Turner, 1986) :

1. Corriger les défauts d'aplombs pré-existants : talons fuyants, encastelés, axe pied-pâturon brisé...
2. Faciliter le départ du pied
3. Utiliser toutes les structures amortissantes du pied et permettre l'expansion des talons
4. Maintenir un exercice régulier de faible intensité.

B. Parage

Le parage a pour but d'accroître significativement la surface d'échange entre le sabot et le sol en améliorant l'uniformité de ce contact et en augmentant le support du poids par la sole périphérique (Hood et al., 2001). Il permet également d'avoir une meilleure répartition de la masse corporelle sur chaque membre en atténuant les différences de morphologie des sabots controlatéraux. Enfin le parage favorise la mise en charge des structures palmaires du pied et rétablit ainsi l'équilibre entre la structure et la fonction de

chaque partie du sabot : les talons dans l'amortissement, la sole périphérique, les barres et la paroi du sabot dans le support du poids, et enfin la pince dans la propulsion.

Comme expliqué précédemment les chevaux naviculaires présentent souvent des talons encastelés de par la mise en place d'un cercle vicieux aboutissant à la perte de leur fonction d'amortisseurs (Wilson et al., 2001a). Afin d'enrayer ce cercle vicieux, il faut réussir à mettre de la pression sur les talons sans que celle-ci ne provoque de douleur qui contraindrait le cheval à éviter l'appui sur cette zone. Cette pression modérée sur les structures palmaires du pied va permettre leur bon développement et ainsi rétablir leur rôle dans la dissipation de l'énergie lors de l'impact au sol. L'erreur à ne pas commettre serait de réaliser un parage excessif des talons sous prétexte qu'ils sont hauts car ceci conduirait à l'élimination d'une épaisseur de talon protectrice sur un pied qui souffre déjà dans sa partie palmaire. Afin d'appliquer une pression uniforme modérée, une méthode efficace consiste à utiliser des plaques de silicone plus épaisses sur leur partie palmaire. Elles présentent le double avantage d'assurer une protection contre les chocs sur l'arrière du pied et de faire participer les talons à l'amortissement en favorisant leur expansion : ceci permet une bonne hémodynamique du pied (Bowker, 2003).

Une fois les défauts d'aplombs pris en compte, il convient de veiller à garder une pince courte. En effet, chez les chevaux ferrés il y a plus de frictions entre les talons et le fer, induisant une usure plus importante de cette partie du sabot : la pousse de la pince est favorisée augmentant ainsi le bras de levier antérieur autour duquel s'effectue la propulsion (Van Heel et al., 2005). Qui plus est, une pince trop longue allonge la durée de la bascule du pied (Willemen et al., 1999b). Ces modifications ont pour conséquence d'amplifier la tension du TFPD et donc la force exercée sur l'os naviculaire. Il est ainsi nécessaire de tronquer la pince verticalement et de faire un « biseau » tout autour du pied pour reculer la position du point de départ du pied afin de faciliter le décollement de ce dernier et de diminuer la tension du TFPD. La pince doit également être parée de manière à ce que l'angle solaire de la phalange distale soit dans sa position physiologique, c'est-à-dire d'environ 5° par rapport à l'horizontale (Denoix, 2002b). Ceci permet d'avoir la phalange distale à plat lors de l'appui en talons. Cette correction doit cependant être adaptée à chaque pied et peut être réalisée de manière progressive en plusieurs parages si cela est nécessaire. En effet il est primordial de conserver avant tout un alignement de la paroi dorsale du sabot avec le paturon et le rétablir un axe pied-paturon correct si tel n'est pas le cas.

C. Ferrures orthopédiques

1. Ferrure compensée en talons

(1) Caractéristiques biomécaniques

La modification de la hauteur des talons fait partie des premiers principes des ferrures orthopédiques appliquées au traitement du syndrome naviculaire en raison du lien évident entre une conformation de pied « pince longue-talons bas » avec la maladie (Turner, 1989; Wright, 1993a). En effet il est généralement admis qu'élever les talons provoque plusieurs remaniements bénéfiques diminuant les contraintes sur la région naviculaire. Ainsi cela :

- Favorise l'appui en talons et le départ du pied (Wilson et al., 1998)
- Augmente l'angle de flexion maximal des articulations IPP et IPD et diminue l'angle d'extension maximal de l'AIPD en quasi-statique (Denoix, 1999b) et en mouvement (Chateau et al., 2006a; Lawson et al., 2007).
- Atténue la tension du TFPD et à l'inverse amplifie la tension du LSB et du TFSD (Lawson et al., 2007).
- Provoque une extension modérée de l'articulation métacarpo-phalangienne (MCP) (Chateau et al., 2006a)

En quasi-statique l'élévation des talons conduit passivement à la flexion de la phalange distale. En dynamique, l'impact va se faire en talons et est alors suivi d'une rotation antihoraire de la phalange distale juste avant la stabilisation du sabot au sol (cf II.B.). Dans tous les cas, ceci conduit à une flexion de l'AIPD et donc relâche la tension du TFPD en raccourcissant sa longueur (Wilson et al., 2001b). En effet le tendon fonctionne comme un ressort pour lequel la force est proportionnelle à sa longueur. Par la suite, la diminution de sa tension se traduit par une réduction du moment de flexion de l'AIPD (Moment = Force x Bras de levier). L'appui étant un état quasi-statique l'équilibre des moments est applicable, par conséquent le moment d'extension créé par la GRF diminue également. Cette réduction entraîne alors le déplacement du PZM vers les talons étant donné que l'intensité de la GRF ne varie pas avec la modification de hauteur des talons : le bras de levier est alors raccourci.

D'autre part la flexion de l'AIPD amenuise directement la force exercée par le TFPD sur l'os naviculaire en ouvrant l'angle de la partie distale du tendon au niveau de la *facies flexoria* de l'os : une élévation de 6° en talons réduit la force subit par l'os de 24% (Eliashar et al., 2004; Willemen et al., 1999b).

L'élévation des talons induit non seulement la diminution de la tension du TFPD au début de la phase d'appui, mais également le retard de la décharge des talons, raccourcissant ainsi la durée de l'appui en pince seule après le décollement des talons. La durée de la propulsion est donc raccourcie, alors qu'il s'agit de la phase où la force de friction exercée par le TFPD sur l'os naviculaire est maximale (Wilson et al., 1998) : la compression de l'os est donc diminuée.

L'effet de l'élévation des talons sur l'articulation MCP est en revanche plus controversé (Willemen et al., 1999b). Il semble qu'une extension modérée soit provoquée mais seulement au pas et sur sol mou (Chateau et al., 2006a). Ce remaniement correspond à une descente du boulet. En revanche aucune modification n'est mise en évidence au trot. L'élévation des talons baisse la tension du LSB mais l'effet sur le TFSD est par contre de moindre importance.

L'utilisation d'une ferrure élevant les talons permet donc bien la réduction des contraintes subies par la région naviculaire. Cependant lorsque qu'une partie du pied est élevée, la conséquence immédiate est le déplacement du PZM vers le côté surélevé ce qui favorise l'impact par cette partie du pied (Wilson et al., 1998). Ainsi la mise en place de talonnettes met plus de poids sur les lamelles palmaires de la paroi du pied : si elles ne sont pas aptes à tolérer cette augmentation, les forces vont dépasser leur capacité mécanique de support du poids et la phalange distale va descendre dans la boîte cornée plutôt que de se fléchir (Wilson et al., 2001b). Lors de talons fuyants par exemple, les lamelles se rapprochent d'une orientation horizontale au lieu de suivre l'inclinaison de la paroi du sabot : elles ne sont plus dans l'axe de l'application du poids et ne remplissent donc plus correctement leur rôle de soutien. De même, lors de talons contractés l'arrière du pied est atrophié et ne participe plus à l'amortissement. Les structures palmaires du pied ne sont alors plus capables de tolérer une charge trop importante, la pousse de la corne est ralentie et on observe un écrasement des talons. Ainsi l'utilisation de cette ferrure est contre-indiquée lorsque l'arrière du pied n'est pas suffisamment développé.

(2) Pose du fer

D'un point de vue pratique, l'élévation des talons peut-être obtenue soit par la mise en place d'un fer dit compensé, c'est-à-dire ayant une épaisseur plus importante en talons, soit par l'utilisation de talonnettes, ou encore par l'application de silicone sur l'arrière du pied et dans les lacunes de la fourchette, maintenu par une plaque de cuir plus épaisse en talons en complément d'un fer habituel (Chateau et al., 2006a; Turner, 1986). Cette dernière méthode présente l'avantage de pouvoir absorber les commotions lors de l'impact du pied sur le sol et de favoriser l'expansion des talons qui s'enfoncent dans les matériaux souples que sont le silicone et le cuir. En faisant participer l'arrière du pied et notamment les barres au soutien postérieur du pied, cette technique redonne de la consistance aux talons. Il est possible de biseauter en plus le contour externe de la plaque de cuir au niveau des talons de manière à augmenter l'amplitude d'expansion des talons (Turner, 1986). De cette manière, l'hémodynamique du pied est favorisée, les structures palmaires vont se développer afin de renforcer les talons et de rétablir leur rôle dans l'amortissement.

Certains auteurs ont corrigé l'angle du sabot au préalable, de manière à compenser l'élévation des talons par la ferrure : l'angle du sabot était paré pour qu'il soit plus aigu que la normale. Ainsi lorsque la ferrure est appliquée, l'axe pied-pâture est correct (Turner, 1986). Cependant d'autres auteurs ont réalisés un parage habituel sans tenir compte de

l'élévation des talons et n'ont pas observé de problème majeur (Chateau et al., 2006a; Willemen et al., 1999b).

2. Fer « Egg-bar »

(1) Caractéristiques biomécaniques

La ferrure en œuf, ou « egg-bar », est rapidement devenue la technique la plus répandue pour le traitement orthopédique du syndrome naviculaire. Une étude rétrospective s'est intéressée à l'effet de l'application de fers egg-bar sur des chevaux naviculaires et a révélé la disparition complète des signes cliniques chez plus de la moitié d'entre eux (Østblom et al., 1984). Dans cette même étude, 20% des chevaux ont eu une atténuation seulement temporaire des symptômes. La prévalence de cet échec thérapeutique pourrait s'expliquer par un suivi de traitement inadéquat du vétérinaire ou du maréchal-ferrant, par la présence d'autres causes de boiterie, d'un stade avancé du syndrome naviculaire ou d'un degré sévère de talons fuyants ou encastelés. La fréquence élevée de déferrage avec l'egg-bar pourrait également être une cause de cet échec (Østblom et al., 1984; Wilson et al., 2001b).

Le fer egg-bar semble particulièrement efficace sur les chevaux ayant des talons fuyants (Turner, 1989; Wilson et al., 2001b). En effet le fer doit dépasser derrière le pied de façon à se trouver dans l'alignement vertical avec les glomes. Ainsi en apportant un soutien supplémentaire en talons il permet une meilleure répartition du poids sur une surface portante plus large (Østblom et al., 1984; Rogers and Back, 2007; Turner, 1989). Cela va soulager l'arrière du pied et rétablir progressivement un alignement correct des tubules de la paroi avec l'axe pied-pâturon.



Figure 43 : Tournure antérieure d'un fer en aluminium Rocking Support® de Michel Vaillant : rocking (biseau postérieur) et rolling (biseau antérieur).

En augmentant la surface de contact de l'arrière du pied avec le sol, le fer ovale diminue l'enfoncement des talons sur une surface déformable au moment de l'impact (Chateau et al., 2006b; Scheffer and Back, 2001). Par ailleurs, la pince s'enfonce plus dans le sol lors de la mise en charge du pied au début de la phase d'appui. Or sur sol mou, la rotation antérieure de l'AIPD n'est pas seulement provoquée par le décollement des talons mais également par l'enfoncement de la pince, contrairement à ce qu'il se produit sur une surface dure. Par conséquent, les talons sont élevés sur des chevaux marchant au pas en ligne droite sur du sable, réduisant ainsi la tension du TFPD. Le LSB et le TFSD sont en revanche mis à contribution étant donné que le boulet va descendre pour compenser l'absence d'enfoncement des talons dans le sol lors de l'amortissement.

En parallèle, l'egg-bar accentue la flexion maximale des articulations IPD et IPP au cours de l'appui de manière similaire à l'effet obtenu par l'utilisation de talonnettes comme décrit ci-avant, permettant encore le relâchement du TFPD (Chateau et al., 2006b). Le fer en œuf diminue en outre l'amplitude de l'extension de l'AIPD lors de la propulsion et donc atténue la force maximale nécessaire au départ du pied et la douleur ressentie par l'hyper-extension de la phalange distale. Enfin, la stabilisation latéro-médiale du pied est améliorée, le rendant moins sensibles aux contraintes asymétriques sur un sol irrégulier, qui participent au stress exercé sur l'appareil podotrochléaire (Chateau et al., 2006b; Denoix, 1999b).

(2) Pose du fer

Avant de mettre en place le fer, les principes de parages précédemment décrits sont réalisés de la même manière : la pince est raccourcie, l'épaisseur inégale de la paroi dorsale du sabot est corrigée par le passage d'une râpe tout autour du pied, l'axe pied-pâturon est rétabli dans la mesure du possible et les défauts de conformation sont pris en compte.

Le point de bascule de la partie postérieure du fer est situé en arrière des talons et de la fourchette : il doit-être placé en dessous des glomes. Le fer peut-être posé avec un ou deux pinçons, cette dernière option permettant un recul plus facile du fer sous le pied. Il est possible et même conseillé de réaliser un biseau important de la rive externe afin de favoriser le départ du pied en pince, en mamelles et en quartiers. La rive externe peut également être biseautée à l'arrière du fer de manière à éviter le contact brutal des talons avec le sol en diminuant le bras de levier postérieur. Enfin il faut veiller à ne pas placer de clous au-delà de la partie la plus large du pied, ce qui empêcherait l'expansion des talons.

Il est très important que le fer soit adapté à la taille du pied et il est souvent nécessaire de changer de taille au cours du suivi du traitement du fait du développement du pied auparavant contracté (Østblom et al., 1984).

La conception du fer en œuf mentionnée ci-dessus est relative à l'emploi de terrains souples et déformables pour le travail des chevaux. En effet des études ont montré l'absence d'action sur la tension du TFPD de la ferrure de type « egg-bar » mais ces études étaient réalisées sur terrains dur (Willemen et al., 1999b). L'efficacité de cette ferrure dépend de son interaction avec le sol : si celui-ci est dur les talons ne peuvent pas s'y enfoncer mais s'il n'est au contraire pas assez ferme certains paramètres du fer (hauteur, couverture) n'ont plus aucune influence. Il est donc primordial de concevoir la ferrure selon les conditions d'utilisation du cheval, et notamment de tenir compte du type de sol sur lequel il est amené à travailler régulièrement. L'egg-bar est à appliquer sur un cheval travaillant sur une surface déformable alors que les fers compensés peuvent être utilisés sur sol dur.

Le principal inconvénient d'une telle ferrure est qu'elle est lourde et donc contraignante pour les chevaux de sport qui ont besoin d'une grande amplitude verticale de mouvement, ainsi que pour les chevaux de course qui reproduisent le cycle des foulées de nombreuses fois. Le poids du fer augmente l'inertie, c'est-à-dire qu'il diminue la capacité du

membre à réagir aux changements de vitesse (Back, Pille, Back and Clayton, 2013, chap. 8). La dépense énergétique du cheval pour réaliser la protraction et la rétraction du membre lors de la phase de soutien est alors plus importante : la fatigabilité est donc majorée. Qui plus est, l'amortissement est moins bon avec des fers lourds car il y a plus de vibrations (Pardoe et al., 2001). C'est pour cela qu'en course les fers d'entraînement sont remplacés par des fers plus légers en aluminium. Cette pratique est appliquée dans l'emploi des fers en œufs qui sont pour la plupart en aluminium.

D'autre part, les chevaux ferrés avec des egg-bars sur les antérieurs ont plus tendance à « forger », c'est-à-dire à frapper les antérieurs avec les postérieurs, du fait du recul du fer sous le pied. Ainsi ces chevaux déferrent plus facilement. Afin de lutter contre cela il est possible de parer les postérieurs avec un angle plus aigu de manière à retarder le « breakover » et donc allonger le temps d'appui des postérieurs par rapport aux antérieurs (Back, Pille, Back and Clayton, 2013, chap. 8). Les fers postérieurs peuvent être tronqués en pince pour que ce soit préférentiellement le sabot et non le fer qui frappe l'antérieur. Il est également possible de mettre des cloches pour protéger les sabots antérieurs.

3. Autres fers

a) *Le fer à l'envers*

Le fer à l'envers, ou fer Napoléon, a été proposé lors d'un congrès par le Professeur J.M.Denoix, en cas de lésions du TFPD. Il s'agit d'un fer mis à l'envers, présentant une large partie postérieure sous les talons ainsi que des branches amincies progressivement dorsalement et biseautées à leur extrémité (cf Figure 44).

Etant donnée que la ferrure est ouverte en pince, l'enfoncement de cette partie du pied et donc la bascule antérieure sont favorisés. Parallèlement, la partie postérieure épaissie atténue la pénétration des talons dans le sol. Ainsi l'extension de l'AIPD est réduite pendant que sa flexion est facilitée : la tension du TFPD est alors amoindrie (Denoix et al., 2007). Ce fer est conçu pour travailler en terrain mou avec toutefois un minimum de réaction du sol. La rive externe est également biseautée en mamelles afin de favoriser le départ du pied durant la propulsion en virage, notamment chez les chevaux de courses évoluant majoritairement sur des courbes. Tout comme l'egg-bar, le fer à l'envers est biseauté sur la rive externe de sa partie la plus palmaire de manière à favoriser la bascule postérieure dans le but de réduire les vibrations lors du poser du pied et l'encastelure chronique des talons.

Bien que l'effet théorique semble être plausible, à l'heure actuelle aucune étude n'a été réalisée pour étudier l'effet d'une ferrure à l'envers sur des chevaux sains ou atteints de lésions du TFPD.

b) Le fer à oignons

Le fer à oignons présente une couverture élargie au niveau des éponges afin de limiter l'enfoncement de la partie postérieure du pied, de protéger les barres et les talons et de répartir correctement les charges (cf Figure 45). Ici encore, un biseau de la rive externe en pince, mamelles et quartiers permet le roulement dorso-latéral et dorso-médial du pied. La large couverture à l'arrière du pied élargit la surface portante et diminue l'enfoncement des talons dans le sol. Il peut être utilisé lors de syndrome naviculaire ou lors de sensibilité en talons (bleimes, abcès,...).

Ici encore aucune étude n'a été réalisée pour étudier l'effet in vivo de ce type de fer.



Figure 44 : Tournure antérieure d'un fer en aluminium Bonapartix® : absence de pince et extrémités des branches amincies pour favoriser le roulement. Rocking et rolling associés.



Figure 45 : Tournure antérieure d'un fer en aluminium JMD Onionix® : la couverture des éponges est élargie pour diminuer l'enfoncement des talons. Rolling associé en pince.

D. Protocole de ferrure

Le traitement orthopédique du syndrome podotrochléaire apparaît plus ou moins efficace selon le cheval traité et cette différence semble majoritairement liée aux grades plus ou moins élevés du syndrome naviculaire ainsi qu'aux défauts de conformation (Østblom et al., 1984; Wilson et al., 2001b). De ce constat est née la proposition de Denoix, visant à adapter la ferrure en fonction du grade clinique observé : il suggère de se baser sur l'évaluation clinique de la réduction de la phase caudale de la foulée en réalisant un huit de chiffres au pas sur sol dur pour grader le handicap et mettre en place un type de ferrure adapté à la symptomatologie, résumée dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** (Denoix, 2002b).

Selon Denoix, le fer à l'envers serait plus efficace que l'egg-bar. L'avantage évident qu'il procure par rapport à ce dernier réside dans la différence d'épaisseur entre les parties palmaire et dorsale du fer. En effet ces deux épaisseurs sont souvent égales sur un egg-bar. La partie palmaire du fer inversé est au contraire bien plus épaisse étant donné que sa partie dorsale est ouverte : l'enfoncement de la pince dans le sol lors du poser du pied est d'autant

plus facilitée (Denoix et al., 2007). D'autre part, le rolling en pince de l'egg-bar favorise certes le départ du pied, mais reste moins efficace que l'ouverture dorsale du fer à l'envers. Enfin, cette ouverture favorise l'usure de la paroi ce qui évite d'avoir une pince trop longue entre deux ferrures.

Le fer à oignons augmente moins la surface portante à l'arrière du pied par rapport à l'egg-bar : il a donc probablement moins d'effet sur l'enfoncement des talons. La partie dorsale du fer est en revanche similaire à un egg-bar.

Tableau 3 : Proposition générale de fers kinésithérapiques selon le grade du handicap fonctionnel chez les chevaux atteints de syndrome podotrochléaire, d'après (Denoix, 2002).

Grade du handicap évalué sur sol dur au pas sur le 8 (cercles alternés de 2 à 3m de diamètre)	Ferrure utilisée
1- Réduction discrète et intermittente de la partie caudale de la foulée à une main seulement (à main correspondante généralement)	Fer à oignons
2- Réduction constante et modérée de la partie caudale de la foulée à une main seulement	Fer ovale ou « egg-bar »
3- Réduction constante et marquée de la partie caudale de la foulée au deux mains	Fer à l'envers (ou fer Napoléon) Ou Fer ovale compensé en talons
4- Réduction constante et marquée de la partie caudale de la foulée dans les trois circonstances (aux deux mains et en ligne droite). Le membre ne dépasse pas la verticale dans une des circonstances de l'examen	Fers à l'envers compensé en talons avec l'extrémité des branches fortement biseautée Ou Fer en M

Le parage et la ferrure kinésithérapique sont des mesures correctives à réévaluer constamment dans le but d'adapter le traitement si nécessaire. Les fers doivent être changés régulièrement toutes les 4 à 6 semaines afin d'éviter la pousse excessive de la pince et l'usure du fer (Østblom et al., 1984; Turner, 1986). La croissance de la corne est d'environ 2.5mm/semaine. Le rétablissement d'un axe de conformation correct est long et nécessite souvent plusieurs parages : il faut en moyenne trois mois pour obtenir un pied mieux conformé (Denoix et al., 2007; Østblom et al., 1984). Une fois cet objectif atteint, si les symptômes initiaux sont suffisamment atténués, il est possible de changer la ferrure en faveur d'un protocole moins lourd ou de revenir à un fer plus conventionnel tout en gardant un « rolling » en pince. La ferrure ayant convenu au traitement peut toutefois être conservée pendant l'entraînement ou la compétition pour éviter la réapparition des signes cliniques.

De manière à laisser une marge de progression si le traitement initial n'est pas assez performant, il est recommandé de ne pas appliquer en première intention la ferrure qui traite le grade le plus sévère (Denoix, 1999a). Il vaut mieux ajuster le traitement en fonction de la réponse du cheval et pouvoir garder des mesures plus efficaces en cas d'aggravation des symptômes. La ferrure doit tenir compte des structures lésées : si on a une atteinte asymétrique d'un des ligaments sésamoïdiens collatéraux, il convient d'augmenter la couverture du côté de la lésion et de favoriser l'enfoncement et le départ du pied du côté opposé.

En ce qui concerne l'activité physique du cheval naviculaire, le repos n'est pas forcément requis et peut même être délétère si le cheval reste trop longtemps au box. Au contraire, une fois que la ferrure la plus adaptée est posée, il est nécessaire de faire travailler le cheval modérément et régulièrement afin de favoriser la restructuration des structures internes palmaires du pied. Ce travail régulier leur confère une meilleure capacité à atténuer les chocs se répercutant sur la région naviculaire. Il faut cependant réaliser un échauffement assez long en ligne droite en évitant le plus possible les courbes serrées, surtout du côté le plus atteint. Le travail doit être effectué sur un sol mou afin de permettre l'effet orthopédique de la ferrure prescrite.

La prise en charge orthopédique du pied est un pilier du traitement du syndrome naviculaire et constitue la part majoritaire du succès thérapeutique. Il n'est cependant pas aisé de la mettre en place car chaque cheval réagit de manière différente et qu'il existe de nombreux facteurs et structures à prendre en compte. Il ne suffit pas de prescrire un type de fer pour atténuer les symptômes, il convient d'observer un suivi régulier du pied afin d'adapter au mieux le protocole en fonction de la réponse du cheval. Ces mesures kinésithérapiques peuvent être associées à des traitements médicaux décrits dans la précédente partie de manière à potentialiser les effets de la ferrure et augmenter ainsi la probabilité de succès.

Nous allons maintenant étudier de manière plus approfondie l'établissement d'un protocole de ferrure par les maréchaux-ferrants ainsi que les types de fers qu'ils utilisent majoritairement parmi l'egg-bar, le fer à l'envers et le fer à oignons pour traiter la maladie naviculaire.

Partie 3 : Enquête autour du protocole de ferrure face au syndrome podotrochléaire auprès de maréchaux ferrants

I. Matériel et Méthode

A. Population concernée

Cette étude est destinée aux maréchaux ferrants étant donné qu'ils tiennent un rôle prépondérant dans le traitement kinésithérapique du syndrome podotrochléaire. En effet ils sont parmi les plus aptes à discuter de l'utilisation pratique des fers orthopédiques et des réalités du terrain venant compliquer l'aboutissement d'un protocole de ferrure prescrit par le vétérinaire. Il nous a donc semblé intéressant de prendre leur avis grâce à un questionnaire dont le but est de rassembler les différents plans de ferrures qu'ils proposent face à un syndrome naviculaire, et d'étudier l'amélioration clinique des chevaux atteints.

L'échange entre les vétérinaires et les maréchaux ferrants est un point essentiel dans la prise en charge d'un cheval puisqu'il permet de mettre en commun les compétences de chacun afin d'optimiser le traitement mis en place. Une partie du questionnaire est d'ailleurs consacrée aux informations que les maréchaux reçoivent ou aimeraient recevoir des vétérinaires avec qui ils travaillent pour aborder un cheval souffrant de maladie naviculaire.

Ces questionnaires ont été distribués de deux manières différentes : d'une part en main propre lors d'une journée de formation proposée aux maréchaux ferrants par Michel Vaillant, fournisseur de matériel et d'outil de maréchalerie, qui s'est déroulée à la Clinéquine de Vetagro Sup le 28 novembre 2014, et d'autre part via un sondage informatique accessible en ligne. Ce dernier a été réalisé sur le site www.sondageonline.fr puis a été envoyé par mail aux maréchaux ferrants. Les adresses e-mails ont été obtenues grâce à la liste des participants au séminaire de novembre et à l'annuaire Marescall mis en place récemment par Michel Vaillant. Les maréchaux ferrants questionnés exerçaient donc dans toute la France.

B. Elaboration du questionnaire

1. Objectifs du questionnaire

L'objectif principal du questionnaire est de mettre en évidence les différents protocoles de ferrures utilisés en première intention par les maréchaux ferrants sur des chevaux atteints de la maladie naviculaire. Il s'intéresse tout particulièrement à l'utilisation des ferrures orthopédiques de type egg-bar, fer à l'envers ou fer à oignons afin de déterminer quel protocole de ferrure semble le plus intéressant selon le grade de la maladie. Plus concrètement les objectifs du questionnaire sont les suivants :

- Rassembler les différents plans de ferrure, les plaques et silicone rajoutés, le temps de ferrure.
- Déterminer s'il existe des lignes de conduite parmi les maréchaux ferrants en fonction du grade de boiterie ou de son origine (ligamentaire, osseuse ou tendineuse).
- Etablir les éléments anamnestiques importants qu'il est nécessaire de fournir aux maréchaux ferrants en tant que vétérinaire pour l'établissement d'une ferrure correcte.
- Mettre en évidence les principales difficultés rencontrées sur le terrain : coût de la ferrure, suivi du protocole, fer qui s'arrache...

2. Rédaction du questionnaire

Le questionnaire est constitué de deux parties majoritaires : la première traitant de l'élaboration du protocole de ferrure et la deuxième s'intéressant au suivi de ce protocole.

La première partie comprend :

- La catégorie sportive des chevaux naviculaires soignés par les maréchaux ferrants.
- La fréquence et les raisons du choix des maréchaux pour l'utilisation des trois fers étudiés (fer à oignons, fer à l'envers et fer egg-bar).
- L'intervalle entre deux ferrures et comment est ce délai par rapport à celui chez un cheval sain.
- Les informations que les maréchaux ferrants reçoivent et qu'ils voudraient recevoir de la part du vétérinaire pour établir la ferrure d'un cheval naviculaire.
- Le protocole de ferrure mis en place en fonction du grade (1 à 4) et de l'origine (osseuse, ligamentaire ou tendineuse) du syndrome naviculaire. On s'intéresse également à l'ajout de plaques et de silicone, ainsi qu'à l'utilisation de fers compensés ou en aluminium.

La deuxième partie nous renseigne sur :

- La fréquence de la modification du protocole initial, les raisons de ces modifications et s'il y a un changement plus fréquemment réalisé.

- La fréquence de l'arrachement de chacun des fers et les recommandations faites par les maréchaux pour l'éviter.
- L'efficacité subjective des trois types de fers
- L'amélioration de la boiterie selon la catégorie sportive des chevaux et leur retour potentiel au niveau d'activité précédant la déclaration des symptômes.

II. Résultats

A. Données générales

Sur les quarante-six maréchaux ferrants questionnés sur la proportion des chevaux naviculaires présents dans leur clientèle au cours des douze derniers mois, 81% estiment suivre moins de 10 chevaux, 17% en suivent entre 10 et 20 et 2% s'occupent de 20 à 50 chevaux naviculaires.

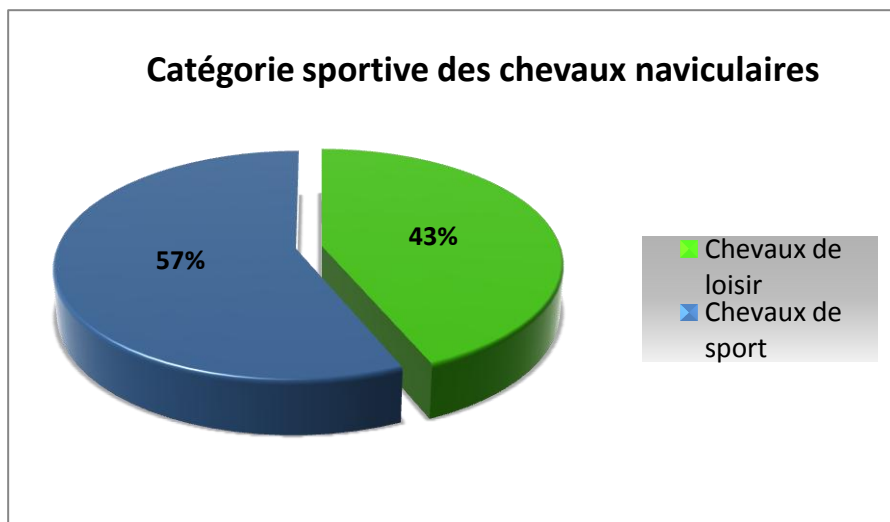


Figure 46 : Catégorie sportive des chevaux naviculaires

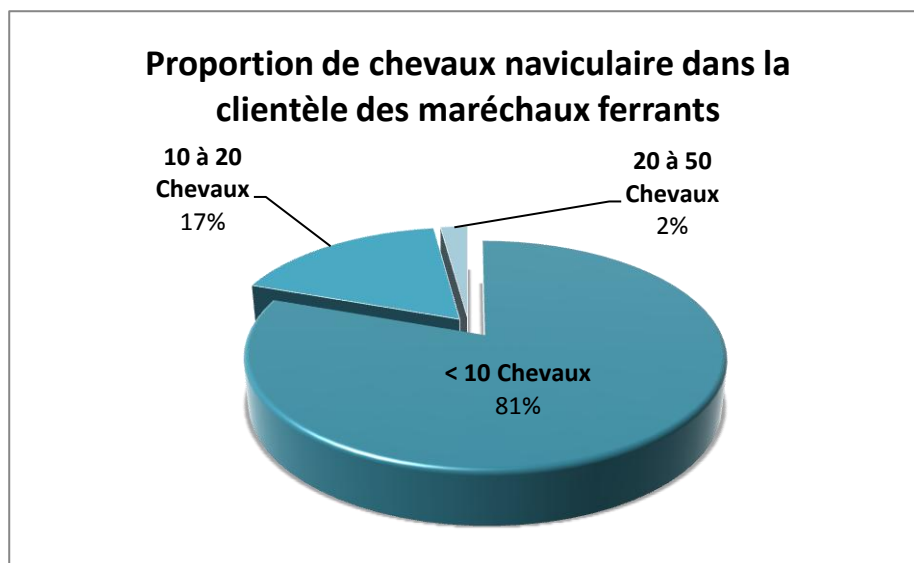


Figure 47 : Proportion de chevaux atteints du syndrome naviculaire dans la clientèle des maréchaux ferrants

Parmi les chevaux naviculaires traités par les maréchaux ferrants, 57% appartiennent à la catégorie des chevaux de sport et 43% sont utilisés pour le loisir. Les chevaux dits « de sport » correspondent majoritairement aux chevaux de saut d'obstacle participant régulièrement à des compétitions de CSO en niveau amateur ou professionnel. Elle comprend également les chevaux de complet, dressage et endurance. Aucun maréchal ferrant n'a répondu avoir traité un cheval de course, confirmant la faible prévalence du syndrome naviculaire dans cette catégorie sportive.

B. Fers orthopédiques utilisés

1. Fréquence d'utilisation

Tableau 4 : Pourcentage d'utilisation par les maréchaux ferrants des fers orthopédiques étudiés (fer à l'envers, egg-bar et fer à oignons)

Utilisation	Oui	Non
Fer à l'envers	87%	13%
Egg-bar	85%	15%
Fer à oignons	69%	31%

On note que les fers à l'envers et egg-bar sont respectivement utilisés par 87% et 85% des maréchaux (cf Tableau 4). En revanche seulement 69% des maréchaux ont recours au fer à oignons. Les autres fers également utilisés pour le traitement du syndrome naviculaire étaient :

- Le fer à planche
- Le fer en cœur (ou heart bar) pour éviter les pressions sur la fourchette
- Le NBS (Natural Balance Shoes) dont l'architecture se base sur la conformation des pieds des chevaux sauvages afin d'obtenir l'équilibre naturel du pied.
- Une ferrure simple avec des branches prolongées.

De plus si l'on étudie la fréquence d'utilisation de ces trois types de fers par les maréchaux, il apparaît que le fer à oignons est moins utilisé que les deux autres avec 44% des maréchaux l'appliquant rarement (cf Tableau 5) dont 31% d'entre-eux ne l'appliquant pas du tout (cf Tableau 4).

Tableau 5 : Fréquence d'utilisation des trois fers orthopédiques étudiés (fer à l'envers, egg-bar et fer à oignons) par les maréchaux ferrants

Fréquence d'utilisation	Rarement (< 30%)	Intermédiaire (30% < X < 60%)	Souvent (60% < X < 80%)	Très souvent (>80%)
Fer à l'envers	26%	33%	30%	11%
Egg-bar	24%	28%	32%	13%
Fer à oignons	44%	21%	25%	10%

2. Raisons principales des choix d'utilisation

40% des maréchaux ferrants disent utiliser majoritairement le fer à l'envers, 35% l'egg-bar, 15% le fer à oignons et 10% n'emploient aucun fer de façon majoritaire. Parmi

ceux privilégiant le fers à l'envers, 77% considèrent qu'il est plus efficace pour diminuer la boiterie, 27% estiment qu'ils l'utilisent plus souvent car les chevaux qu'ils traitent sont plutôt concernés par une boiterie dont le grade requiert un fer à l'envers (cf Figure 48).

Les maréchaux qui ferment plus couramment avec l'egg-bar ont choisit ce fer pour 56% d'entre eux parce qu'il leur semble plus efficace, pour 31% d'entre eux parce qu'ils sont plus souvent confrontés aux grades de boiterie pour lesquels ils appliquent l'egg-bar, pour 19% parce qu'il tient mieux en place et que le cheval déferre moins souvent et enfin 12% d'entre eux pour d'autres raisons que les trois proposées.

En revanche, seulement 14% des maréchaux ferrants utilisent le fer à oignons parce qu'ils trouvent que son efficacité est supérieure par rapport aux autres ferrures. Les raisons principales ayant conduit au choix préférentiel du fer à oignons ne sont pas non plus reliées à une fréquence plus élevée du grade clinique correspondant au fer à oignons : 43% des maréchaux ferrants appliquant en majorité ce fer l'utilisent pour d'autres raisons parmi lesquelles son faible coût, sa légèreté et le peu de contraintes qu'il entraîne sur l'appareil suspenseur du boulet, favorisant par la suite un retour à la compétition.

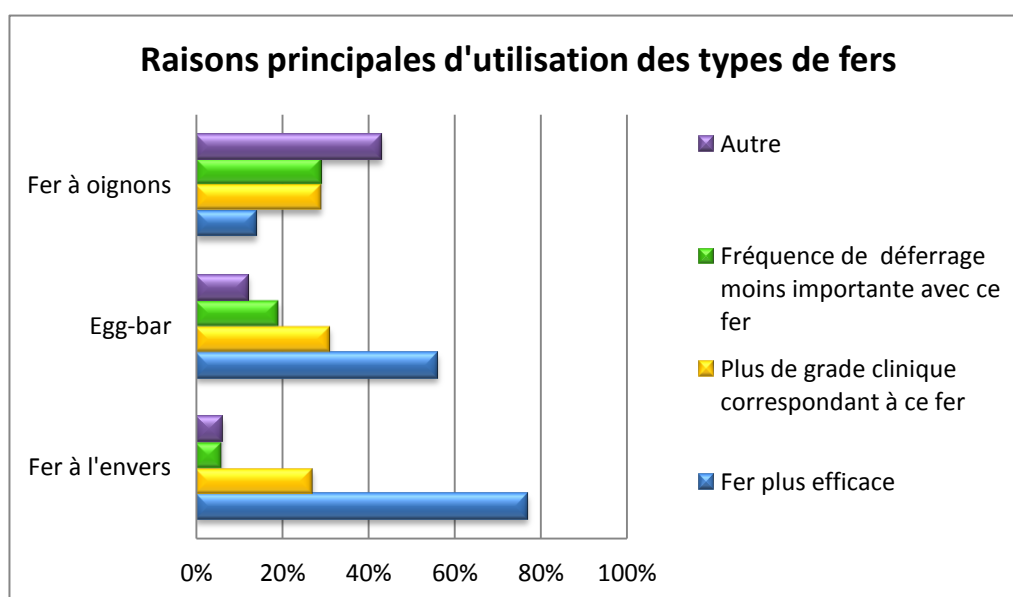


Figure 48 : Raisons principales du choix d'utilisation de chacun des trois types de fers étudiés. Le choix des réponses à cette question du sondage étant multiple, il est normal d'avoir un pourcentage total dépassant 100%.

C. Relation avec le vétérinaire

Seulement 7.5% des maréchaux ferrants n'ont besoin que du diagnostic le plus basique, sans connaître l'origine de la maladie (ligamentaire, osseuse ou tendineuse), pour ferrer correctement un cheval naviculaire. Au contraire 92.5% souhaitent connaître l'origine du syndrome avec le diagnostic de « maladie naviculaire », ainsi que d'être renseigné sur le grade de la boiterie. Cependant ils ne sont respectivement que 75% et 57.5% à recevoir ces informations de la part du vétérinaire. En ce qui concerne le type de fer à poser, 77.5% reçoivent cette information mais ils ne sont que 52.5% à la souhaiter, estimant souvent

mieux connaître le cheval que les vétérinaires et être donc plus à même d'appliquer la ferrure qui convient. De même seulement 47.5% estiment avoir besoin de l'avis du vétérinaire pour l'ajout de silicone. Certains ont ajouté préférer recevoir le principe de la ferrure à appliquer plutôt que le type de fer de la part du vétérinaire.

Il est intéressant de noter qu'un faible nombre de maréchaux (2.5%) souhaitent avoir accès aux radiographies pour mieux visualiser les aplombs avant d'appliquer le ferrage.

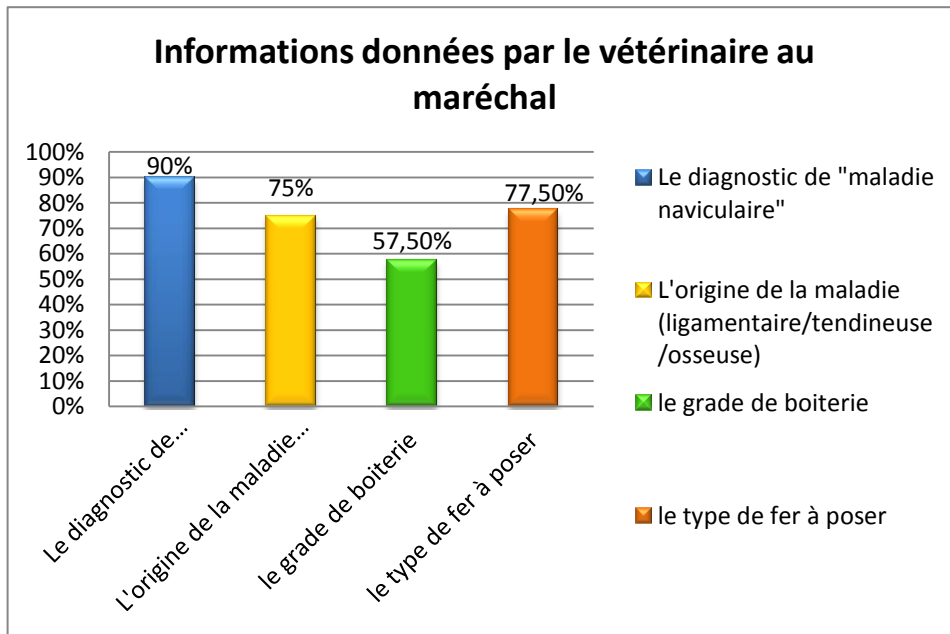


Figure 49 : Informations données par le vétérinaire au maréchal suite au diagnostic d'un syndrome naviculaire en vue de mettre en place une ferrure orthopédique

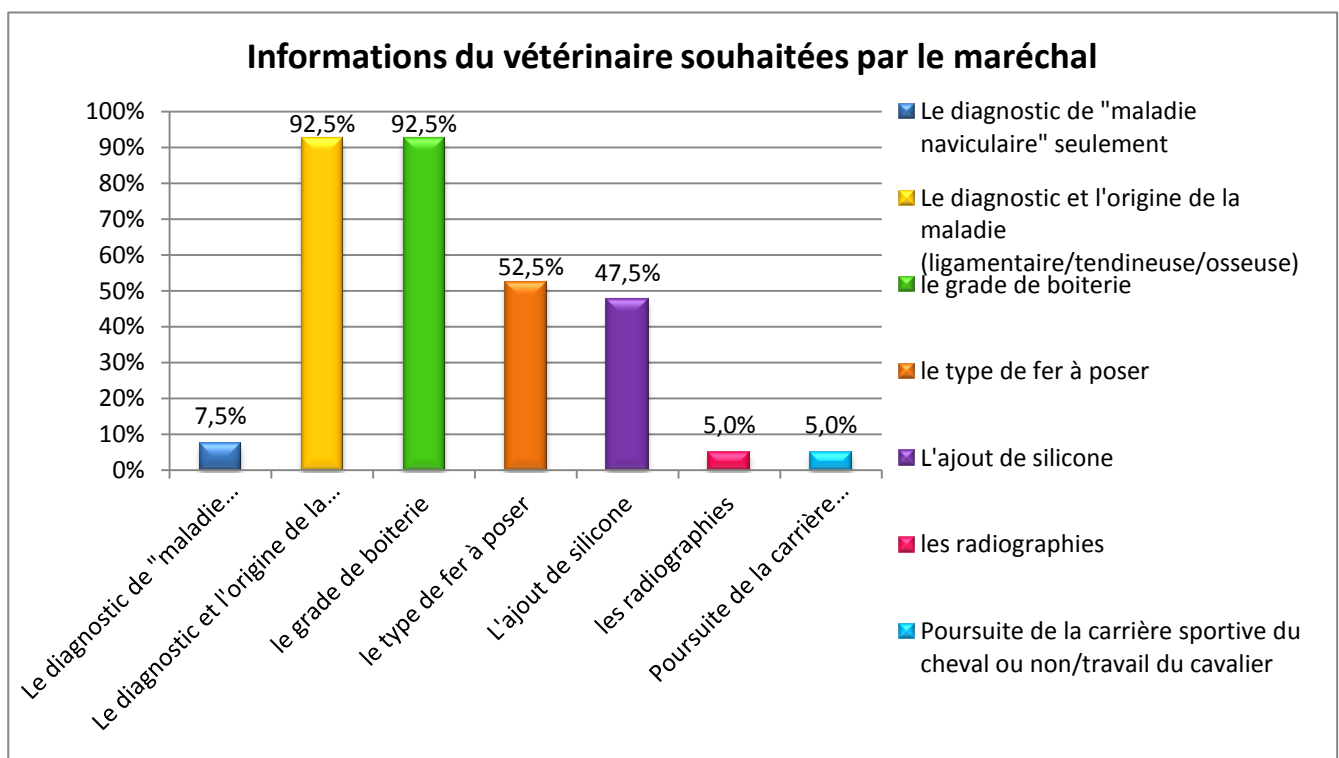


Figure 50 : Informations que le maréchal souhaite recevoir de la part du vétérinaire afin de mettre en place la ferrure la plus adaptée

D. Protocole de ferrure

1. Temps de ferrure

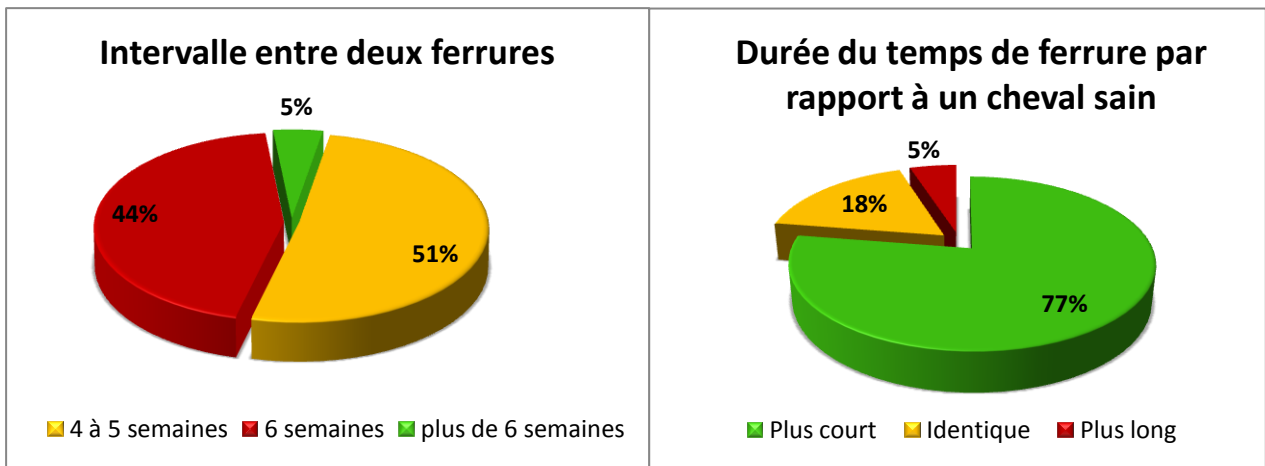


Figure 51 : Graphiques représentant le temps de ferrure généralement appliqué par les maréchaux ferrants (à gauche) et comment se situe ce délai par rapport à un cheval sain ferré normalement (à droite)

La majorité des maréchaux (95%) ferrurent les chevaux naviculaires pour une durée de moins de six semaines. Parmi eux, 51% ferrurent pour quatre à cinq semaines et 44% laissent le fer plus longtemps jusqu'à six semaines. Ces intervalles entre deux parages sont plus courts par rapport au délai de ferrure d'un cheval sain pour 77% des maréchaux. 18% ferrurent pour la même durée, que le cheval soit naviculaire ou non, et 5% laissent le fer plus longtemps sur un cheval naviculaire. D'autre part, certains rapportent ne pas hésiter à parer toutes les trois semaines les chevaux naviculaire évoluant à haut niveau sportif.

2. Protocole de ferrure en fonction du grade et de l'origine

Afin de mieux étudier les corrélations entre les différents constituants d'un protocole de ferrure et le grade de boiterie, une analyse des correspondances multiples (ACM) a été appliquée au jeu de données obtenu à partir du tableau de la question 13 du questionnaire. Nous avons retenu les facteurs de corrélations supérieurs à 0.25. Ces rapports de corrélation indiquent dans quelle mesure une variable est bien représentée sur un axe. Le principe général est de repérer les variables ayant des contributions importantes aux axes et de regarder ensuite leur positionnement sur le graphique.

Le graphique suivant représente la carte factorielle des variables étudiées (grade de boiterie, origine de la maladie, type de fer posé, fer en aluminium, fer compensé, ajout de plaques et/ou de silicone) selon les deux premières dimensions. Sur l'axe 1, le grade de boiterie est corrélé à l'utilisation des fers en aluminium, des fers compensés et à l'ajout de plaques et de silicone :

- Les fers en aluminium sont plus utilisés sur les grades élevés de boiterie (3 et 4).
- Les fers compensés sont surtout appliqués sur les grades élevés et notamment le grade 4.

- Les plaques et le silicone sont ajoutés majoritairement pour les grades supérieurs à 3.
- Le fer à oignons est appliqué préférentiellement pour les grades faibles de boiterie et notamment le grade 1. En revanche les fers à l'envers et egg-bar sont difficilement différenciables mais sont tout deux plus utilisés pour les grades élevés (3 et 4).

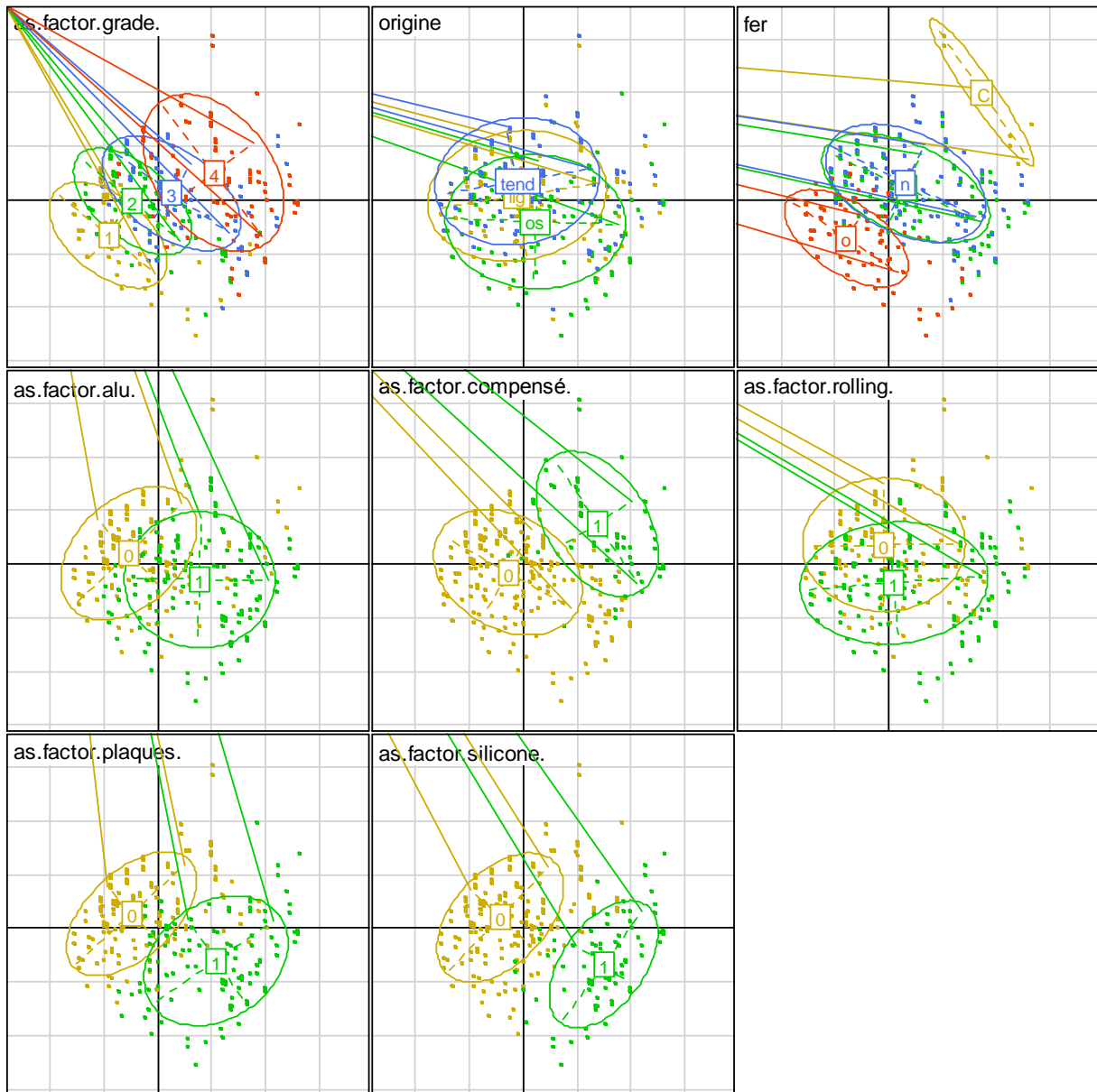


Figure 52 : Carte factorielle des modalités étudiées (grade de boiterie, origine du syndrome naviculaire, type de fer posé, fer en aluminium et compensés, ajout de plaques et de silicone et ajusture à la française) lorsque l'on étudie l'axe 1. Le chiffre 1 est utilisé lorsque la variable étudiée est employée.

D'autre part, l'origine de la maladie naviculaire ne peut être corrélée avec le type de fer appliqué, quel que soit l'axe étudié. Il ne semble donc pas y avoir de préférence chez les maréchaux ferrants d'un type de fer en particulier en fonction du lieu de la lésion à l'origine du syndrome podotrochléaire.

Le biseau du fer en pince et en mamelles, également appelé « ajusture à la française », n'est pas utilisé pour traiter préférentiellement un grade ou une origine particulière. Il est employé de manière équitable pour tous les grades de boiterie. Cependant en moyenne 48% seulement des maréchaux mettent en place ce « rolling » sur les fers des chevaux naviculaires.

Les talonnettes sont globalement peu utilisées par les maréchaux ferrants avec au maximum 30% d'entre eux qui l'utilisent sur un grade 4 d'origine tendineuse (cf Figure 52). Ils en posent préférentiellement sur des grades élevés de boiterie et plutôt lorsque le syndrome podotrochléaire est d'origine tendineuse ou ligamentaire. Cette tendance graphique n'est cependant pas significative ($p=0.06$).

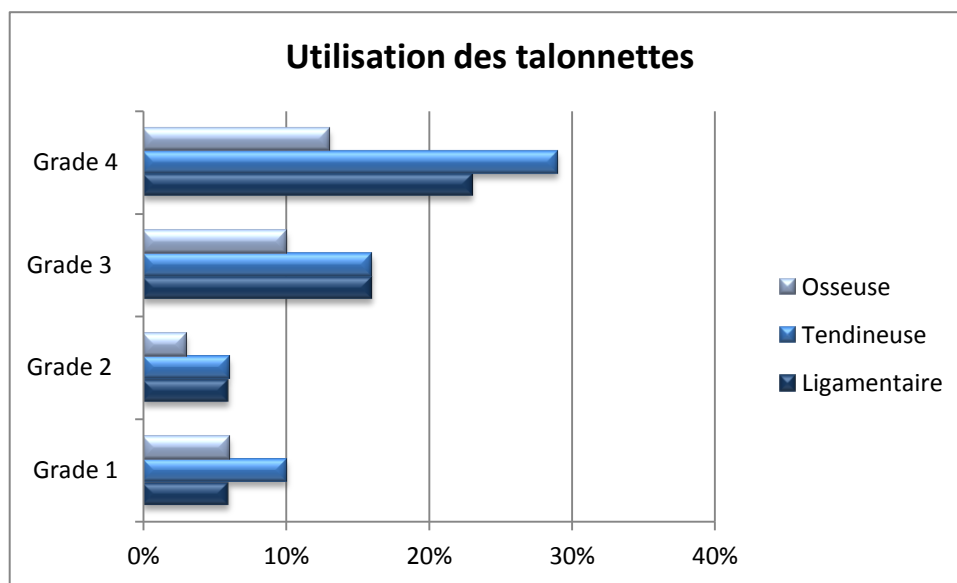


Figure 53 : Préférences d'utilisation des talonnettes en fonction du grade et de l'origine du syndrome podotrochléaire

3. Spécificités particulières du protocole

Lorsque les maréchaux ferrants utilisent des fers compensés ou des talonnettes, 43% les laissent le temps d'une ferrure, 41% pour deux ou trois ferrures et 16% pour plus de trois ferrures. Enfin lorsqu'un seul antérieur semble boiteux 88% des maréchaux ferment les deux pieds avec le même type de fer. De même, lorsque l'atteinte est bilatérale mais à des grades différents 95% utilisent le même type de fer pour les deux antérieurs.

E. Suivi du protocole

1. Modification du plan de ferrure initial

77% des maréchaux estiment devoir changer rarement (c'est-à-dire 1 à 5 cas sur 10) le plan de ferrure posé initialement, 16% le modifient sur plus de la moitié de leur cas et 7% ne le changent jamais. Parmi les raisons motivant le maréchal ferrant à modifier son plan de ferrure initial on retrouve pour 81% l'amélioration de la boiterie : un fer plus adapté au grade clinique observé est alors mis en place. Cependant pour 42% des maréchaux la

boiterie peut au contraire être aggravée, la ferrure n'ayant pas été assez efficace : le plan de ferrure peut alors être modifié de manière à être plus performant en changeant le type de fer et/ou en ajoutant des plaques ou du silicone. La somme des pourcentages n'est pas égale à 100 du fait des réponses multiples.

Si les raisons cliniques semblent être les plus importantes, les considérations pratiques ne sont pas négligeables. Ainsi 48% des maréchaux notifient que le coût de la ferrure orthopédique peut motiver le propriétaire à préférer une ferrure plus classique. De même 30% d'entre-eux estiment qu'ils changent de fer parce qu'il s'arrache trop souvent. Par ailleurs, l'egg-bar est le fer qui s'arrache le plus souvent pour 74% des maréchaux, mais 48% pensent également que le fer à l'envers est également prédisposé à s'arracher. Les différentes recommandations données par les maréchaux pour éviter que ces fers ne s'arrachent sont les suivantes :

- Utiliser des cloches pour protéger la ferrure lorsque le cheval travaille.
- Réduire l'activité hors travail : éviter le pré lorsque le cheval est ferré, mettre en paddock.
- Mettre un fort biseau en pince et en mamelles pour faciliter le départ du pied et éviter l'effet « ventouse » de l'egg-bar, notamment sur les sols boueux.
- Mettre un biseau à l'arrière du fer
- Faire un compromis sur le recul du fer entre son effet bénéfique sur la diminution de l'enfoncement des talons et le fait que la probabilité des interférences entre les postérieurs et les antérieurs soit augmentée.
- Utiliser une taille de fer plus petite.
- Mettre une ferrure plus lourde aux postérieurs.

2. Efficacité des fers egg-bar, à l'envers et à oignons

90% des maréchaux ayant participé à l'étude pensent que l'efficacité de chacun des fers étudiés est différente. Si l'on calcule la moyenne arithmétique des rangs obtenus lors du classement par efficacité des fers egg-bar, à l'envers et à oignons, on obtient un score de 1.78 pour le fer à l'envers, de 1.93 pour l'egg-bar et de 2.4 pour le fer à oignons (cf Figure 54). Selon l'opinion des maréchaux ferrants, l'efficacité semble donc significativement différente selon le type de fer utilisé ($p < 0.05$) mais avec une distinction moins nette entre les fers à l'envers et egg-bar.

D'autre part, interrogés sur la capacité d'amélioration de la boiterie en fonction de la catégorie sportive du cheval, 61% des maréchaux estiment qu'elle est indépendante du type de travail que le cheval fournit, 23% pensent que l'amélioration de la boiterie est meilleure sur les chevaux de loisir et 16% répondent qu'au contraire, ce sont les chevaux de sport qui récupèrent mieux. Ainsi la majorité des maréchaux sont d'avis que la catégorie sportive à laquelle appartenait le cheval lorsque le diagnostic a été posé, ne conditionne pas la durée nécessaire à l'amélioration de la boiterie.

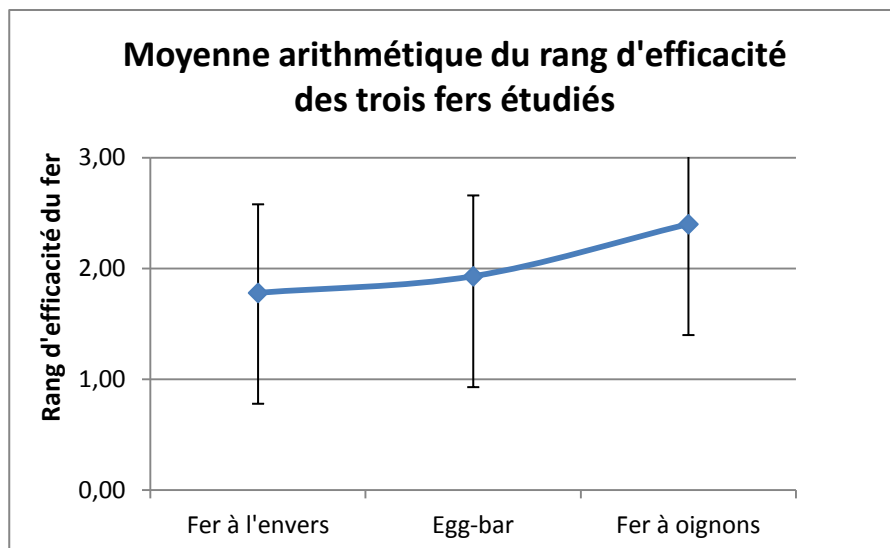


Figure 54 : Moyenne arithmétique et écarts types des rangs d'efficacité (de 1 à 3) obtenus par chacun des fers suites au classement réalisé par les maréchaux

Cependant, 94% considèrent que le cheval de loisir retourne à un niveau d'activité proche de celui précédent l'apparition de la boiterie dans plus de la moitié des cas, et même 36% estiment que cela arrive dans plus de 9 cas sur 10 (cf Figure 55). En revanche seulement 55% sont convaincus que le cheval de sport peut de nouveau être utilisé pour le travail auquel il était destiné dans plus de la moitié des cas, avec à peine 10% des maréchaux envisageant un retour aussi probant dans plus de 9 cas sur 10. Ainsi il semble que si la disparition de la boiterie ne dépend pas de la catégorie sportive du cheval, la reprise du travail est revanche facilitée par la réalisation d'un effort modéré par la suite.

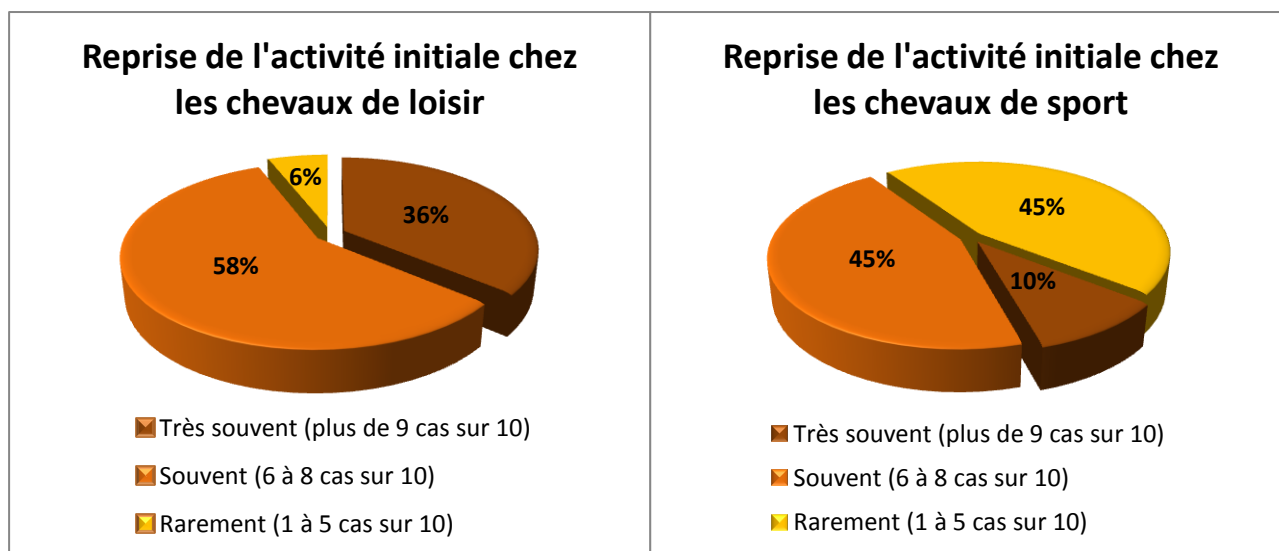


Figure 55 : Diagramme évaluant la reprise de l'activité sportive au niveau atteint avant le diagnostic de la maladie naviculaire

III. Discussion

Selon les maréchaux ferrants la prévalence de la maladie naviculaire semble être plus importante chez les chevaux de sports. Cette prédisposition est en accord avec Ratzlaff qui prétend que les activités contraignants le cheval à réaliser des arrêts rapides et des changements brusques de direction entraînent un stress plus important sur l'appareil podotrochléaire (Ratzlaff and White, 1989). Cependant une autre étude révèle au contraire que la proportion des chevaux naviculaires est plus faible parmi ceux participant à des concours aux niveaux élevés, et que cela s'explique par la « sélection naturelle » des chevaux plus aptes à réaliser des performances importantes, n'étant pas limités par des lésions sub-cliniques de l'appareil podotrochléaire (Wright, 1993a). La prévalence du syndrome semble donc être influencée par le type de travail effectué et par les capacités intrinsèques du cheval à résister aux contraintes imposées par cette activité.

- **Mise en place du protocole de ferrure**

Cette étude montre qu'il y a bien une utilisation préférentielle des fers à l'envers, egg-bar et à oignons par les maréchaux en fonction du grade de boiterie observé, comme décrit par J.M.Denoix (Denoix, 2002b). Cependant le cadre précis du tableau de choix du fer proposé par Denoix n'est pas exactement retrouvé ici (cf Partie 2 III.D). Si dans cette étude le fer à oignons est effectivement employé majoritairement pour les grades faibles de boiterie, il est plus difficile de distinguer le choix des maréchaux pour les fers egg-bar et inversé : ils sont tout deux utilisés pour les grades 2 à 4 mais on ne peut différencier l'emploi préférentiel de l'un par rapport à l'autre selon la sévérité de la boiterie. Ainsi les maréchaux utilisent autant le fer napoléon que le fer ovale pour les grades supérieurs à 2, le choix dépendant de l'expérience propre du pareur.

La raison principale expliquant ces choix est d'ailleurs la différence d'efficacité de ces fers. Cette étude montre en effet que du point de vue des maréchaux, la capacité d'atténuation de la boiterie n'est pas la même selon le fer posé : ici encore le fer à oignons est moins performant que les deux autres et les rangs d'efficacité obtenus par ces derniers sont proches, avec un léger avantage pour le fer napoléon. Lorsque le fer à oignons est choisi pour ferrer un cheval naviculaire c'est d'une part parce que le grade de boiterie est faible mais surtout pour sa légèreté par rapport au fer ovale, pour le peu de contraintes qu'il entraîne sur le LSB, favorisant par la suite un retour à la compétition et parce qu'il a moins tendance à se déferrer. Au contraire les fers à l'envers et ovale sont choisis pour leur efficacité, et notamment sur les grades élevés de boiterie. Cependant il n'existe pas d'étude actuellement pour comparer ces choix, et ce questionnaire ne permet pas de conclure quant à l'existence effective d'une efficacité différente entre les fers à l'envers, egg-bar et à oignons mais seulement de mettre en évidence les lignes de conduite et le point de vue des maréchaux ferrants.

Ces derniers ne tiennent pas compte de manière significative du site des lésions pouvant être à l'origine du syndrome (classées en trois catégories dans cette étude : ligamentaire, osseuse et tendineuse) pour choisir le type de fer qu'ils vont poser. Ici encore il n'y a aucune étude justifiant l'utilisation préférentielle d'un type de fer par rapport aux autres pour traiter une origine particulière. En revanche il est intéressant de distinguer les atteintes symétriques et asymétriques du TFPD ainsi que des ligaments sésamoïdiens collatéraux et distal impair pour modifier le fer choisi : lors d'atteintes asymétriques le fer doit avoir une couverture plus importante sur la branche correspondant au côté de la lésion afin de diminuer l'enfoncement de cette partie du sabot et donc de diminuer la tension de la structure lésée (Denoix et al., 2007).

L'application d'un rolling sur le fer en pince et en mamelles est réalisée indépendamment du grade de boiterie. Seulement 48% des maréchaux en moyenne l'utilisent alors que le fait de reculer le point de départ du pied est considéré comme une mesure essentielle dans le traitement de la maladie naviculaire. En effet la bascule du pied s'opère de manière plus progressive lorsque le fer est biseauté en pince, et permet une charge moins importante du poids du corps sur le pied au moment où la pince quitte le sol (Van Heel et al., 2006). Dans le même objectif, il est important de biseauter les éponges des branches du fer napoléon pour avoir un effet similaire (Denoix et al., 2007). Cette faible prévalence de maréchaux utilisant le rolling est cependant à prendre avec précaution car certains d'entre-eux peuvent utiliser des fers préfabriqués ayant déjà un biseau de réalisé sur la rive externe du fer. Ceci soulève d'ailleurs la difficulté d'obtenir une uniformisation des ferrures orthopédiques utilisées étant donné qu'un même type de ferrure peut-être obtenu de plusieurs manières différentes avec des caractéristiques intrinsèques plus ou moins marquées. L'interprétation de leur efficacité est ensuite altérée par ces différences.

Les plaques et le silicone sont ajoutées surtout pour les grades élevés de boiterie : en effet si ces adjonctions se révèlent très performantes pour diminuer les pressions et les chocs sur l'arrière du pied souvent mal développé chez les chevaux naviculaires, leur coût n'est pas négligeable et est un facteur limitant de leur utilisation. Elles sont donc utilisées pour optimiser le confort du cheval et protéger l'arrière du pied sur des grades avancés de boiterie. Ce sont des outils intéressants soulageant notamment la douleur perçue en talons lors du poser du pied. Ceci permet au cheval de retrouver une biomécanique correcte et ainsi d'enrayer le cercle vicieux perpétuant la pathologie.

Certains maréchaux utilisent des plaques en aluminium car selon eux, les talons glissent dessus alors qu'ils s'enfoncent dans le plastique : on a donc une expansion plus importante de l'arrière du sabot au moment de l'appui, favorisant le développement des structures palmaires du pied. La plaque peut être ouverte sur la fourchette de manière à évacuer la terre à chaque foulée tout en protégeant le tiers central de la fourchette et diminuant la surface portante des talons.

Les fers en aluminium sont eux-aussi plus couramment utilisés sur les grades de boiterie sévères : ici encore on peut interpréter cette différence du fait du coût

supplémentaire que représente ce matériau. Le fer en aluminium présente l'avantage d'être moins lourd et donc de diminuer les vibrations occasionnées par le poser du sabot sur le sol (Pardoe et al., 2001). De plus alléger les parties basses des membres favorise les gestes sportifs que sont la répétition des foulées pour le cheval de course et le saut en hauteur pour le cheval de sport. Cependant le coût supplémentaire de ce fer peut freiner la volonté du propriétaire de réaliser le maximum pour traiter son cheval. Il est à noter que certains maréchaux ferrants ajoutent en commentaires que l'on garde plus longtemps un bon aplomb avec un fer en acier plutôt qu'en aluminium qui s'use plus vite et qu'il faut donc remplacer plus souvent.

La faible fréquence d'utilisation des talonnettes parmi les maréchaux ferrants de cette étude vient confirmer la tendance actuelle de ne pas les utiliser en raison de l'écrasement des talons dont elles sont responsables à long terme : 30% au maximum affirment les utiliser sur un grade 4 d'origine tendineuse. Le site de la lésion principale occasionnant le syndrome naviculaire semble graphiquement influencer leur emploi par les pareurs puisque ceux-ci posent des talonnettes préférentiellement sur les origines tendineuses surtout, mais également ligamentaires (cf Figure 53). L'hypothèse d'emploi des talonnettes sur des atteintes tendineuses, notamment sur des grades 4, se justifie par la diminution évidente de la tension du TFPD que cela occasionne (cf Partie 2 III.C.1). Cependant cette hypothèse n'est pas démontrée significativement ($p=0.06$), une des raisons possibles étant le nombre insuffisant de réponses au questionnaire pour voir des tendances se dessiner quant à l'utilisation des talonnettes.

En revanche l'emploi des fers compensés est relié à la sévérité de la boiterie : ils sont en effet appliqués plus particulièrement sur les grades 4. Ce choix se justifie par le fait qu'ils constituent un dernier recours pour les grades sévères de boiterie étant donné qu'ils entraînent à moyen terme l'écrasement des talons ainsi que la rétraction du TFPD et des ligaments sésamoïdiens distaux (Denoix, 2002b). En effet l'élévation des talons déplace le centre de pression statique vers l'arrière du pied qui supporte plus de poids, diminuant ainsi la pousse de la corne au niveau des talons qui s'encastèlent alors. D'autre part, si l'appui en talons est favorisé lorsque ceux-ci sont élevés, il est tout de même possible que la phalange distale soit suffisamment rehaussée de sorte que même en posant le sabot en talons et non en pince, c'est le bord dorsal de la phalange distale qui « heurte » le sol, provoquant les mêmes effets délétères que lors du poser en pince. Leur utilisation doit donc être modérée.

Le temps de maintien des fers compensés ou des talonnettes mis en évidence par cette étude correspond par ailleurs à la durée préconisée par Denoix, à savoir au maximum 2 ou 3 ferrures. Ici 43% les laissent le temps d'une ferrure, 41% pour 2 ou 3 ferrures et seulement 16% pour plus de trois ferrures. Qui plus est, les fers compensés ne sont efficaces que sur sol dur et ne conviennent donc pas pour la compétition. Certains maréchaux préconisent le rajout de silicone conjointement à l'utilisation des talonnettes afin de mieux répartir les charges sur la sole et la fourchette pour limiter que les talons s'encastèlent.

Enfin comme conseillé dans la littérature, les maréchaux ont tendance à ferrer les deux antérieurs avec le même type de fer lorsque l'atteinte est unilatérale ou bilatérale à

des grades différents (Denoix, 2002b; Østblom et al., 1984). Denoix précise que la différence se fait en modifiant le relevé en pince et la couverture postérieure de chacun des fers.

- **Suivi du protocole**

Les ferrures sont mises en place pour une durée de 4 à 6 semaines en fonction de la saison, la pousse du sabot étant plus faible en hiver, mais aussi du choix du propriétaire. Cette durée est plus courte par rapport au temps de ferrure d'un cheval sain. En effet, le parage et la ferrure orthopédique sont des mesures évolutives qui doivent donc être réajustées selon l'évolution clinique du cheval naviculaire. Dans la littérature on ne trouve que des références concernant le fer ovale qui est laissé en place 5 semaines par Østblom (Østblom et al., 1984). L'utilisation de fers en aluminium raccourcit d'autant plus le temps de ferrure étant donné qu'ils s'usent plus vite.

La ferrure mise en place initialement par les maréchaux ferrants est rarement modifiée par la suite et lorsque cela se produit c'est majoritairement parce que la boiterie s'est améliorée et qu'il est donc possible de mettre en place un fer plus classique et moins coûteux. Le coût est en effet une des raisons pouvant limiter un suivi correct du protocole initial de ferrure si le propriétaire ne souhaite pas continuer à utiliser le fer orthopédique mis en place pour des raisons économiques. Cette situation est d'autant plus fréquente qu'il est rarement possible de réutiliser un fer en aluminium étant donné leur usure trop importante. D'autre part, la dégradation des symptômes initiaux peut motiver le changement du protocole de ferrure pour 42% des maréchaux. Lorsque cela se produit, les pareurs mettent en commentaires qu'ils ajoutent alors des plaques de cuir, du silicone, changent de type de fer ou encore amplifient le rolling. Ces mesures viennent confirmer la recommandation de Denoix qui préconisait de ne pas poser le protocole le plus efficace en première intention afin de garder des moyens d'ajuster le traitement en fonction de la réponse du cheval (Denoix, 2002b).

Un tiers des maréchaux ont répondu que la fréquence de déferrage d'un fer était une raison motivant le changement du type de ferrure. Selon leur avis, l'egg-bar est le fer qui s'arrache le plus souvent, suivi par le fer à l'envers. Les mesures recommandées par les maréchaux afin d'éviter l'arrachement du fer correspondent aux principes énoncés dans la littérature pour lutter contre les interférences entre les antérieurs et les postérieurs : il est possible de favoriser le départ du pied des antérieurs, de permettre le dégagement du fer en cas de contact avec le postérieur en mettant un biseau sur les éponges, de modifier le poids des fers pour mieux équilibrer les chevaux, ou encore de jouer sur le positionnement du fer pour éviter que le sabot postérieur ne touche le fer (Back, Pille, Back and Clayton, 2013, chap. 8). Les cloches et la restriction de l'activité hors travail sont également de bons compromis pour prévenir l'arrachage du fer.

En ce qui concerne le retour à l'activité exercée avant la déclaration des symptômes, il y a plus de réussite du traitement selon le point de vue des maréchaux parmi les chevaux

de loisir. Plus précisément, la catégorie sportive initiale ne conditionne pas l'amélioration de la boiterie : un cheval de sport a autant de chance de répondre au traitement à court terme qu'un cheval de loisir. En revanche le type de travail qu'est amené à réaliser le cheval après la réussite du traitement influence la disparition complète des symptômes et l'apparition de récurrences. En effet on attend moins d'un cheval de loisir en terme de performances et d'intensité d'efforts et l'amélioration en paraît donc meilleure à la remise au travail. Le traitement aura plus de réussite si le travail demandé par la suite n'est pas trop important et que la ferrure est changée régulièrement. Il est donc logique que le retour au même niveau qu'avant le diagnostic de maladie naviculaire chez les chevaux de sport soit moins fréquent que chez les chevaux de loisir. Les chevaux de saut ayant une activité exerçant de fortes contraintes sur l'appareil naviculaire, ils vont être prédisposés à présenter des récurrences ou bien des atteintes sub-cliniques. Il aurait d'ailleurs été intéressant de demander la prévalence des grades de boiteries observés parmi les chevaux de loisir et de sport afin de déterminer si ces derniers sont plus sévèrement atteints.

La remise au travail du cheval ne doit se faire qu'après la pose du fer adapté mais il est possible de ne pas observer de temps de repos. Le sol doit-être souple et les terrains durs doivent être proscrits. L'échauffement doit-être long, le travail doit éviter les voltes trop serrées dans la mesure du possible, notamment du côté le plus douloureux.

- **Echange d'informations entre le vétérinaire et le maréchal ferrant**

La grande majorité des maréchaux (93%) ayant répondu au questionnaire souhaitent connaître l'origine de la maladie naviculaire en plus du diagnostic et seulement 75% reçoivent cette information du vétérinaire. Cette volonté de connaître l'origine peut sembler paradoxale étant donné qu'aucun lien n'a pu être établie entre le site de la lésion à l'origine du syndrome et l'utilisation d'un type de fer en particulier ou l'ajout de plaques, de silicone ou de talonnettes. Cette différence peut s'expliquer par le fait que chaque maréchal applique un protocole de ferrure selon les critères qu'il s'est fixé et qu'il est donc difficile de mettre en évidence des lignes de conduite parmi les maréchaux étant donné le nombre important de tendances différentes. Aucun consensus n'ayant établi qu'il faille appliquer un type de fer en particulier selon le lieu d'origine du syndrome naviculaire, chaque maréchal ferrant met à profit son expérience pour choisir le meilleur protocole. Il est donc important que le vétérinaire communique l'origine du syndrome naviculaire, de même que le grade de boiterie, puisque ces deux critères sont essentiels aux yeux des maréchaux ferrants pour l'établissement correct d'un traitement orthopédique.

Plus que le type de fer à utiliser, il est intéressant de fournir l'explication du principe orthopédique de la ferrure à employer pour que le maréchal puisse par la suite mettre en place le protocole de ferrure le plus adapté en tenant compte de son expérience personnelle, de sa connaissance plus approfondie du cheval par rapport au vétérinaire, de la volonté d'implication du propriétaire et du coût final. Enfin un faible nombre de maréchaux souhaitent avoir les radiographies du pied afin de déterminer quelles sont les mesures

correctives à réaliser afin d'obtenir un meilleur aplomb. Ce dernier point est sans doute amené à se développer et peut-être un bon moyen de renforcer la communication entre vétérinaire et maréchal ferrant.

Les maréchaux sont bien conscients des avantages prodigués par les différents ajouts de plaques et/ou de silicone mais bien souvent le facteur limitant de leur emploi est le coût supplémentaire que cela occasionne. Ainsi il n'est pas primordial de préciser s'il faut ajouter des plaques ou du silicone, le maréchal analysant leur emploi en fonction de l'évolution des symptômes du cheval et de la volonté économique du propriétaire. En revanche il est intéressant d'insister sur la mise en place d'un rolling sur les parties dorsales du fer étant donné que seulement 48% en moyenne des maréchaux ont recours au biseau en pince et en mamelles dans le traitement orthopédique de la ferrure naviculaire, d'autant plus qu'il s'agit d'une mesure n'entraînant pas de surcoût financier.

L'échange d'informations entre vétérinaire et maréchal est primordial pour le bien du cheval et du propriétaire. Chaque professionnel a une idée différente de la façon dont un problème doit être abordé, notamment pour le syndrome naviculaire où la pathogénie n'est pas clairement définie et où le traitement des différentes structures atteintes peut être abordé de plusieurs manières. Tous ont besoin d'accepter le fait qu'il puisse y avoir une nouvelle manière, une façon plus efficace de procéder.

CONCLUSION

Le syndrome naviculaire est une affection orthopédique fréquente pouvant être à l'origine de contre-performances, notamment chez les chevaux de sport qui exercent une activité appliquant de fortes contraintes sur l'appareil podotrochléaire. Un parage adéquat et la mise en place d'une ferrure correctrice sont des mesures primordiales dans la prise en charge d'un cheval atteint d'un syndrome naviculaire. Plusieurs types de fers s'offrent à nous parmi lesquels les fers à oignons, *egg-bar*, et à l'envers (ou Napoléon). L'*egg-bar* a fait l'objet de plusieurs études mais aucune n'a été réalisée pour vérifier l'efficacité réelle des fers à l'envers et à oignons.

Si l'origine exacte du syndrome naviculaire n'est pas encore élucidée, il est en revanche admis que la biomécanique du cheval joue un rôle primordial dans l'établissement des affections de cette région. La conformation du sabot et des os du cheval mais également la manière dont il exécute sa foulée conditionnent l'établissement de forces délétères pour les structures internes du pied. Tous ces éléments sont à prendre en compte afin de prescrire la ferrure qui correspondra le mieux aux besoins du cheval.

Face à ce syndrome, le maréchal ferrant constitue un allié privilégié du vétérinaire dans la prescription et le suivi du traitement, en étant constamment confronté aux réalités pratiques du terrain. Il est essentiel de mettre en commun les expériences et les contraintes de chacun afin de définir ce qui est le mieux pour le cheval et les moyens pour y parvenir. Cette étude a permis de mettre en évidence la ferrure privilégiée par les maréchaux en fonction du grade de boiterie observé, ainsi que les raisons principales de ce choix. On s'aperçoit alors qu'il ne faut pas seulement tenir compte de l'efficacité intrinsèque du fer mais également de sa fréquence d'arrachage, du coût qu'il représente à la fabrication, du nombre de ferrures, du temps pendant lequel il doit être appliqué, ainsi que des éventuelles modifications à faire en fonction de la réponse du cheval. Les trois fers ont chacun des avantages différents qu'il convient d'utiliser pour mettre en place la ferrure la plus adaptée.

A l'avenir il serait intéressant de réaliser une étude rétrospective des cas de syndrome naviculaire traités par l'une des trois ferrures étudiées afin de confirmer l'existence d'une réelle différence d'efficacité.

Thèse de Mr Stanislas du LAU d'ALLEMANS

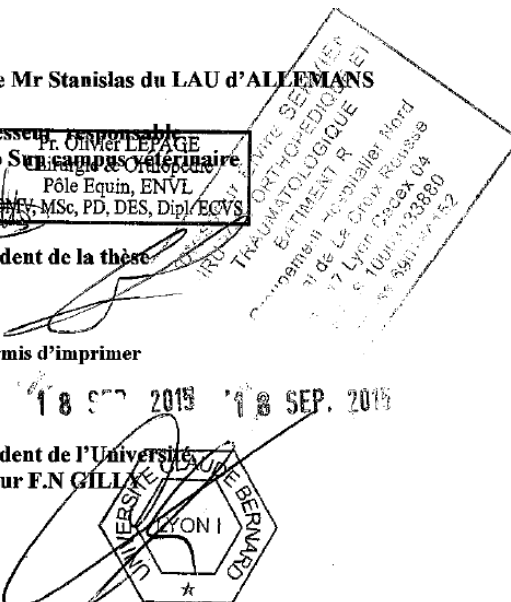
Le Professeur responsable
VetAgro Sup, Campus vétérinaire
Pôle Equin, ENVL
MSc, PD, DES, Dipl. ECVS

Le Président de la thèse

Vu et permis d'imprimer

Lyon, le 18 SEP. 2015

Le Président de l'Université
Professeur F.N GILLIE



Le Directeur général
VetAgro Sup

L. Freyburger
D.E.V.E.

BIBLIOGRAPHIE

- Back, W., Pille, 2013. The role of the hoof and shoeing. In : Back, W., Clayton, H.M., *Equine locomotion*. Saunders Elsevier, 147-169.
- Blunden, A., Dyson, S., Murray, R., Schramme, M., 2006a. Histopathology in horses with chronic palmar foot pain and age-matched controls. Part 1: Navicular bone and related structures. *Equine Vet. J.* 38, 15-22.
- Blunden, A., Dyson, S., Murray, R., Schramme, M., 2006b. Histopathology in horses with chronic palmar foot pain and age-matched controls. Part 2: The deep digital flexor tendon. *Equine Vet. J.* 38, 23–27.
- Bowker, R.M., 2003. Contrasting structural morphologies of “good” and “bad” footed horses, in: *Proc. Am. Ass. Equine Practnrs.* 186–209.
- Bowker, R.M., Atkinson, P.J., Atkinson, T.S., Haut, R.C., 2001. Effect of contact stress in bones of the distal interphalangeal joint on microscopic changes in articular cartilage and ligaments. *Am. J. Vet. Res.* 62, 414–424.
- Bowker, R.M., Brewer, A.M., Vex, K.B., Guida, L.A., Linder, K.E., Sonea, I.M., Stinson, A.W., 1993a. Sensory receptors in the equine foot. *Am. J. Vet. Res.* 54, 1840–1844.
- Bowker, R.M., Linder, K., Sonea, I.M., Guida, L.A., 1995. Sensory nerve fibres and receptors in equine distal forelimbs and their potential roles in locomotion. *Equine Vet. J.* 27, 141–146.
- Bowker, R.M., Rockershouser, S.J., Vex, K.B., Sonea, I.M., Caron, J.P., Kotyk, R., 1993b. Immunocytochemical and dye distribution studies of nerves potentially desensitized by injections into the distal interphalangeal joint or the navicular bursa of horses. *J. Am. Vet. Med. Assoc.* 203, 1708–1714.
- Bowker, R.M., Van Wulfen, K.K., Springer, S.E., Linder, K.E., 1998. Functional anatomy of the cartilage of the distal phalanx and digital cushion in the equine foot and a hemodynamic flow hypothesis of energy dissipation. *Am. J. Vet. Res.* 59, 961–968.
- Bowker, R.M., 2010. Functional anatomy of the palmar aspect of the foot. In : Ross, M.W., Dyson, S.J. *Diagnosis and Management of Lameness in the Horse. Elsevier Health Sciences*, 320-323.
- Busoni, V., Heimann, M., Trenteseaux, J., Snaps, F., Dondelinger, R.F., 2005. Magnetic resonance imaging findings in the equine deep digital flexor tendon and distal sesamoid bone in advanced navicular disease-an ex vivo study. *Veterinary Radiology & Ultrasound* 46 (4), 279–286.
- Butler, J., Colles, C., Dyson, S., Kold, S., Poulos, P., 2011. Foot, pastern and fetlock. In : *Clinical Radiology of the Horse*. John Wiley & Sons, 102-128
- Campbell, J.R., Lee, R., 1972. Radiological Techniques in the Diagnosis of Navicular Disease. *Equine Vet. J.* 4, 135–138.
- Chateau, H., Degueurce, C., Denoix, J.-M., 2006a. Three-dimensional kinematics of the distal forelimb in horses trotting on a treadmill and effects of elevation of heel and toe. *Equine Vet. J.* 38, 164–169.
- Chateau, H., Degueurce, C., Denoix, J.M., 2006b. Effects of egg-bar shoes on the 3-dimensional kinematics of the distal forelimb in horses walking on a sand track. *Equine Vet. J.* 38, 377–382.

- 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 Vet. J.* 41, 247–251.
- Colles, C.M., 1982. Navicular disease and its treatment. *In Pract.* 4, 29–36.
- Colles, C.M., Hickman, J., 1977. The arterial supply of the navicular bone and its variations in navicular disease. *Equine Vet. J.* 9, 150–154.
- 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.
- Davies, H.M.S., Meritt, J.S., Thomason, J.J., 2013. Biomechanics of the equine foot. In : Floyd, A.E., Mansmann, R.A., *Equine Podiatry*. Elsevier Health Sciences, 42-56.
- Denoix, J.M., 2002a. Le syndrome podotrochléaire, ou maladie naviculaire. I. Clinique, diagnostic et pronostic, *Pratique Vétérinaire Equine, Hors Série 34*, 61-68.
- Denoix, J.M., 2002b. Le syndrome podotrochléaire, ou maladie naviculaire.II. Traitement, gestion et conduite à tenir, *Pratique Vétérinaire Equine, Hors Série 34*, 69-73.
- Denoix, J.M., 1999a. Functional anatomy of the equine interphalangeal joints, in: *Proc. Am. Ass. Equine Practns.*, 174–177.
- Denoix, J.M., 1999b. Les origines du syndrome podotrochléaire en relation avec la biomécanique. *Presented at the 6ème Congrès de Médecine et de Chirurgie équine, Genève*, p. 107–113.
- Denoix, J.M., 1994. Functional anatomy of tendons and ligaments in the distal limbs (manus and pes). *Vet. Clin. North Am. Equine Pract.* 10, 273–322.
- Denoix, J.M., Crevier-Denoix, N., Château, H., 2007. Corrective shoeing of equine foot injuries. *Presented at the 10ème Congrès de Médecine et de Chirurgie équine, Genève* 136–143.
- Denoix, J.M., Thibaud, D., Riccio, B., 2003. Tiludronate as a new therapeutic agent in the treatment of navicular disease : a double-blind placebo-controlled clinical trial. *Equine Vet. J.* 35, 407–413.
- Dik, K.J., van den Belt, A.J.M., van den Broek, J., 2001. Relationships of age and shape of the navicular bone to the development of navicular disease: a radiological study. *Equine Vet. J.* 33, 172–175.
- Dik, K.J., van den Broek, J., 1995. Role of navicular bone shape in the pathogenesis of navicular disease: a radiological study. *Equine Vet. J.* 27, 390–393.
- Doige, C.E., Hoffer, M.A., 1983. Pathological changes in the navicular bone and associated structures of the horse. *Can. J. Comp. Med.* 47, 387–395.
- Dyhre-Poulsen, P., Smedegaard, H.H., Roed, J., Korsgaard, E., 1994. Equine hoof function investigated by pressure transducers inside the hoof and accelerometers mounted on the first phalanx. *Equine Vet. J.* 26, 362–366.
- Dyson, S., 2011. Radiological interpretation of the navicular bone. *Equine Vet. Educ.* 23, 73–87.

- Dyson, S.J., Kidd, L., 1993. A comparison of responses to analgesia of the navicular bursa and intra-articular analgesia of the distal interphalangeal joint in 59 horses. *Equine Vet. J.* 25, 93–98.
- Dyson, S.J., Murray, R., 2007. Magnetic Resonance Imaging of the Equine Foot. *Clin. Tech. Equine Pract.* 6, 46–61.
- Dyson, S., Murray, R., Schramme, M., Blunden, T., 2011. Current concepts of navicular disease: Current concepts of navicular disease. *Equine Vet. Educ.* 23, 27–39.
- Dyson, S., Murray, R., Schramme, M., Branch, M., 2003. Lameness in 46 horses associated with deep digital flexor tendonitis in the digit: diagnosis confirmed with magnetic resonance imaging. *Equine Vet. J.* 35, 681–690.
- Dyson, S., 2010. Navicular Disease. In : Ross, M.W., Dyson, S. *Diagnosis and Management of Lameness in the Horse*. Elsevier Health Sciences, 324-342.
- Eliashar, E., 2012. The Biomechanics of the Equine Foot as it Pertains to Farriery. *Vet. Clin. North Am. Equine Pract.* 28, 283–291.
- Eliashar, E., McGuigan, M.P., Wilson, A.M., 2004. Relationship of foot conformation and force applied to the navicular bone of sound horses at the trot. *Equine Vet. J.* 36, 431–435.
- Hertsch, B., Dammer, H., 1988. The Blood Supply of Normal and Diseased Navicular Bones. *Vet. Radiol.* 29, 276–281.
- Hickman, J., 1989. Navicular disease--what are we talking about? *Equine Vet. J.* 21, 395–398.
- Hood, D.M., Taylor, D., Wagner, I.P., 2001. Effects of ground surface deformability, trimming, and shoeing on quasistatic hoof loading patterns in horses. *Am. J. Vet. Res.* 62, 895–900.
- Jones, W.E., 2004. Navicular syndrome or navicular disease? *J. Equine Vet. Sci.* 24, 51–52.
- Jones, W.E., 2002. Navicular syndrome: An entire foot problem. *J. Equine Vet. Sci.* 22, 272–272.
- Kainer, R.A., 2002. W.E., 2002. Functional anatomy of equine locomotor organs. In : *Adams Lameness in horses*, 1-23.
- Kaser-Hotz, B., Ueltschi, G., 1992. Radiographic Appearance of the Navicular Bone in Sound Horses. *Vet. Radiol. Ultrasound* 33, 9–17.
- Kidd, J.A., Lu, K.G., Frazer, M.L., 2014. *Atlas of equine ultrasonography*. Wiley-Blackwell
- K. N. Thompson, J.R.R., 1991. Considerations on the pathogenesis of navicular disease. *J. Equine Vet. Sci.* 11, 4–8.
- Lawson, S.E.M., Chateau, H., Pourcelot, P., Denoix, J.-M., Crevier-Denoix, N., 2007. Effect of toe and heel elevation on calculated tendon strains in the horse and the influence of the proximal interphalangeal joint. *J. Anat.* 210, 583–591.
- Leach, D.H., 1993. Treatment and pathogenesis of navicular disease ('syndrome') in horses. *Equine Vet. J.* 25, 477–481.
- Lose, M.P., 1995. Flexor tendon tension imbalance in the equine and how it relates to the etiology of navicular disease. *J. Equine Vet. Sci.* 15, 508–510.

- MacGregor, C.M., 1989. Navicular disease - in search of definition. *Equine Vet. J.* 21, 389–391.
- MacGregor, C.M., 1986. Radiographic assessment of navicular bones, based on changes in the distal nutrient foramina. *Equine Vet. J.* 18, 203–206.
- MacGregor, C.M., 1984. Studies on the pathology and treatment of equine navicular disease -PhD Thesis.
- Matthews, S., Dart, A., Dowling, B., 2003. Palmar digital neurectomy in 24 horses using the guillotine technique. *Aust. Vet. J.* 81, 402–405.
- Moyer, W., Schumacher, J., Schumacher, J., 2011. *Equine Joint Injection and Regional Anesthesia*. Academic Veterinary Solutions, LLC.
- Noble, P., Collin, B., Denoix, J.-M., Sertejn, D., 2011. Étude des contraintes mécaniques locomotrices chez le cheval, in: *Annales de Médecine Vétérinaire*. Université de Liège.
- Østblom, L.C., Lund, C., Melsen, F., 1984. Navicular bone disease: Results of treatment using egg-bar shoeing technique. *Equine Vet. J.* 16, 203–206.
- Østblom, L.C., Lund, C., Melsen, F., 1982. Histological study of navicular bone disease. *Equine Vet. J.* 14, 199–202.
- Pardoe, C.H., McGuigan, M.P., Rogers, K.M., Rowe, L.L., Wilson, A.M., 2001. The effect of shoe material on the kinetics and kinematics of foot slip at impact on concrete. *Equine Vet. J.* 33, 70–73.
- Pollitt, C.C., 2010. The Anatomy and Physiology of the Suspensory Apparatus of the Distal Phalanx. *Vet. Clin. North Am. Equine Pract.* 26, 29–49.
- Pool, R.R., Meagher, D.M., Stover, S.M., 1989. Pathophysiology of navicular syndrome. *Vet. Clin. North Am. Equine Pract.* 5, 109–129.
- Poulos, P.W., Smith, M.F., 1988. The Nature of Enlarged “vascular Channels” in the Navicular Bone of the Horse. *Vet. Radiol.* 29, 60–64.
- Ratzlaff, M.H., White, K.K., 1989. Some biomechanical considerations of navicular disease. *J. Equine Vet. Sci.* 9, 149–153.
- Rijkenhuizen, A.B.M., 2006. Navicular disease: a review of what’s new. *Equine Vet. J.* 38, 82–88.
- Rijkenhuizen, A.B.M., Németh, F., Dik, K.J., Goedegebuure, S.A., 1989. The arterial supply of the navicular bone in adult horses with navicular disease. *Equine Vet. J.* 21, 418–424.
- 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 Vet. J.* 41, 253–256.
- Roepstorff, L., Johnston, C., Drevemo, S., 2001. In vivo and in vitro heel expansion in relation to shoeing and frog pressure. *Equine Vet. J.* 33, 54–57.
- Rogers, C.W., Back, W., 2007. The effect of plain, eggbar and 6 degrees-wedge shoes on the distribution of pressure under the hoof of horses at the walk. *N. Z. Vet. J.* 55, 120–124.
- Rooney, J.R., 1998. *The Lamé Horse*. The Russell Meerdink Company Ltd.

- Rose, R.J., 1996. Navicular disease in the horse. *J. Equine Vet. Sci.* 16, 18–24.
- Rose, R.J., 1978. Navicular disease in the horse : an analysis of seventy cases and assessment of a special radiographic view. *J. Equine Med. Surg.* 2, 492–497.
- Scheffer, C.J.W., Back, W., 2001. Orthopaedics: Effects of “navicular” shoeing on equine distal forelimb kinematics on different track surface. *Vet. Q.* 23, 191–195.
- Schneider, N., Busoni, V., la Rebière de Pouyade, G. de, Denoix, J.-M., Weyrauch, K.D., 2008. Examen échographique transcunéen post mortem de l’appareil podotrochléaire équin à l’aide des sondes linéaires et sectorielles, in: *Annales de Médecine Vétérinaire*. Université de Liège.
- Schneider, R.K., Gavin, P.R., Tucker, R.L., 2003. What MRI is Teaching us about Navicular Disease. *Proc Am Assoc Equine Pract* 49, 210-217.
- Schramme, M.C., Boswell, J.C., Hamhougias, K., Toulson, K., Viitanen, M., 2000. An in vitro study to compare 5 different techniques for injection of the navicular bursa in the horse. *Equine Vet. J.* 32, 263–267.
- Schramme, M.C., Murray, R.C., Blunden, A.S., Dyson, S.J., 2005. A comparison between magnetic resonance imaging, pathology, and radiology in 34 limbs with navicular syndrome and 25 control limbs. *American Association of Equine Practitioners (AAEP)*, 348–358.
- Schumacher, J., Schumacher, J., Gillette, R., Degraives, F., Schramme, M., Smith, R., Perkins, J., Coker, M., 2003. The effects of local anaesthetic solution in the navicular bursa of horses with lameness caused by distal interphalangeal joint pain. *Equine Vet. J.* 35, 502–505.
- Schumacher, J., Schumacher, J., Schramme, M.C., Degraives, F., Smith, K.W., 2007. Diagnostic analgesia of the equine foot. In : Floyd, A.E., Mansmann, R.A., *Equine Podiatry*. Elsevier Health Sciences, 128-140.
- Sherlock, C., Mair, T., Blunden, T., 2008. Deep erosions of the palmar aspect of the navicular bone diagnosed by standing magnetic resonance imaging. *Equine Vet. J.* 40, 684–692.
- Stashak, T.S., 2002. Lameness. In : *Adams and Stashak’s Lameness in Horses*, 5th Edition. Lippincott Williams & Wilkins, 664-679.
- Svalastoga, E., 1983. Navicular disease in the horse. A microangiographic investigation. *Nord. Vet. Med.* 35, 131–139.
- Svalastoga, E., Smith, M., 1983. Navicular disease in the horse. The subchondral bone pressure. *Nord. Vet. Med.* 35, 31–37.
- Thomason, J.J., 1998. Variation in surface strain on the equine hoof wall at the midstep with shoeing, gait, substrate, direction of travel, and hoof shape. *Equine Vet. J. Suppl.* 86–95.
- Turner, T.A., 1989. Diagnosis and treatment of the navicular syndrome in horses. *Vet. Clin. North Am. Equine Pract.* 5, 131–144.
- Turner, T.A., 1986. Shoeing principles for the management of navicular disease in horses. *J. Am. Vet. Med. Assoc.* 189, 298–301.
- Van Heel, M., Moleman, M., Barneveld, A., Weeren, P.R., Back, W., 2005. Changes in location of centre of pressure and hoof-unrollment pattern in relation to an 8-week shoeing interval in the horse. *Equine Vet. J.* 37, 536–540.

- Van Heel, M., van Weeren, P.R., Back, W., 2006. Shoeing sound warmblood horses with a rolled toe optimises hoof-unrollment and lowers peak loading during breakover. *Equine Vet. J.* 38, 258–262.
- Vanschepdael, P., 2011. *Anatomie et physiologie du sabot du cheval*. Les Compagnons du Devoir.
- Widmer, W.R., Buckwalter, K.A., Fessler, J.F., Hill, M.A., Vansickle, D.C., Ivancevich, S., 2000. Use of radiography, computed tomography and magnetic resonance imaging for evaluation of navicular syndrome in the horse. *Vet. Radiol. Ultrasound* 41, 108–116.
- Willemen, M.A., Jacobs, M.W.H., Schamhardt, H.C., 1999a. In vitro transmission and attenuation of impact vibrations in the distal forelimb. *Equine Vet. J.* 31, 245–248.
- Willemen, M.A., Savelberg, H., Barneveld, A., 1999b. The effect of orthopaedic shoeing on the force exerted by the deep digital flexor tendon on the navicular bone in horses. *Equine Vet. J.* 31, 25–30.
- Williams, G.E., 2001. Locomotor characteristics of horses with navicular disease. *Am. J. Vet. Res.* 62, 206–210.
- Wilson, A.M., McGuigan, M.P., Fouracre, L., MacMahon, L., 2001a. The force and contact stress on the navicular bone during trot locomotion in sound horses and horses with navicular disease. *Equine Vet. J.* 33, 159–165.
- Wilson, A.M., McGuigan, M.P., Pardoe, C., 2001b. The biomechanical effect of wedged, eggbar and extension shoes in sound and lame horses, in: *Proc Am Assoc Equine Pract.*, 339–343.
- Wilson, A.M., Seelig, T.J., Shield, R.A., Silverman, B.W., 1998. The effect of foot imbalance on point of force application in the horse. *Equine Vet. J.* 30, 540–545.
- Wilson, A.M., Weller, R., 2010. Biomechanics of the equine limb and its effect in lameness. In : *Diagnosis and Management of Lameness in the Horse*, 270-281.
- Wright, I.M., 1993a. A study of 118 cases of navicular disease: clinical features. *Equine Vet. J.* 25, 488–492.
- Wright, I.M., 1993b. A study of 118 cases of navicular disease: radiological features. *Equine Vet. J.* 25, 493–500.
- Wright, I.M., 1993c. A study of 118 cases of navicular disease: treatment by navicular suspensory desmotomy. *Equine Vet. J.* 25, 501–509.
- Wright, I.M., Kidd, L., Thorp, B.H., 1998. Gross, histological and histomorphometric features of the navicular bone and related structures in the horse. *Equine Vet. J.* 30, 220–234.

ANNEXES

Annexe 1 : Questionnaire envoyé aux maréchaux ferrants



VetAgro Sup

Campus Vétérinaire
de Lyon

Ministère de l'Agriculture et de l'Agro-Alimentaire et de la Forêt

Institut d'enseignement supérieur et de recherche
en alimentation, santé animale, sciences agronomiques et de l'environnement

QUESTIONNAIRE FERRURE CHEVAL NAVICULAIRE **En vue de la réalisation d'une thèse de Doctorat vétérinaire**

Thèse réalisée par Stanislas du Lau d'Allemands, encadrée par le Professeur M.Gangl de l'Ecole Vétérinaire de Lyon.

Ce questionnaire vise à rassembler les différents plans de ferrures utilisés par les maréchaux ferrants et d'étudier l'amélioration clinique des chevaux atteints de la Maladie Naviculaire suite à l'utilisation d'une ferrure orthopédique de type egg-bar, fer à l'envers ou fer à oignons afin de déterminer quel protocole de ferrure semble le plus intéressant selon le grade de la maladie naviculaire.

En effet de nombreuses études ont été réalisées sur l'efficacité théorique de ces 3 types de fers sur la maladie mais très peu s'intéressent à leur efficacité réelle.

Ce questionnaire est distribué à un échantillon de maréchaux ferrants.

Les « grades » de la maladie naviculaire correspondent au degré de boiterie observé : ils sont au nombre de 4.

- *Grade 1 = boiterie intermittente discrète à une main seulement*
- *Grade 2 = boiterie constante modérée à une main seulement*
- *Grade 3 = boiterie constante marquée à une main et présente à main opposée*
- *Grade 4 = boiterie constante et marquée en ligne droite et aux deux mains*

L'origine ligamentaire correspond à l'atteinte des ligaments sésamoïdiens collatéraux et/ou du ligament distal impair.

L'origine tendineuse correspond à l'atteinte du tendon fléchisseur profond dans la région de l'os naviculaire.

L'origine osseuse correspond à des lésions majoritairement situées dans l'os naviculaire, sans atteinte des ligaments et tendon associés.

Partie 1 : Etude du protocole de ferrure

1. A combien estimez vous la proportion de chevaux naviculaires dans votre clientèle au cours des 12 derniers mois ?

< 10 Chevaux	10 à 20 Chevaux	20 à 50 Chevaux	> 50 Chevaux

A quelle catégorie appartiennent ils majoritairement ?

- Chevaux de loisir (ballades, dressage ou CSO de loisir niveau club)
- Chevaux de sport (en compétition de manière régulière niveau amateur/pro)
- Chevaux de course (trot ou galop)

2. De manière générale quel(s) type(s) de fers orthopédiques utilisez vous pour traiter la maladie naviculaire ?

- | | Oui | Non |
|------------------|--------------------------|--------------------------|
| • Fer à l'envers | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| • Fer à oignons | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| • Fer Egg-bar | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| • Autre : | <input type="checkbox"/> | Précisez : |

3. A quelle fréquence ?

- | | Rarement
(< 30%) | Intermédiaire
(30%<X<60%) | Souvent
(60%<X<80%) | Très souvent
(>80%) |
|------------------|--------------------------|------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| • Fer à l'envers | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| • Fer à oignons | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| • Fer Egg-bar | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| • Autre | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

4. Parmi ces 3 types de fers, y a-t-il un type que vous utilisez majoritairement pour le traitement de la maladie naviculaire ?

- Fers à l'envers
- Fers à oignons
- Fer Egg-bar
- Aucun n'est majoritaire

5. Si oui, Pourquoi ?

- Plus d'efficacité avec ce fer
- Plus de grade clinique correspondant à ce type de fer
- Le fer reste mieux en place (moins de déferrage)
- Autres :

6. Quelles informations recevez vous du vétérinaire lorsque vous ferrez un cheval naviculaire ?

	Oui	Non
Le diagnostic de « maladie naviculaire »	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
L'origine de la maladie (osseuse/ligament/tendineuse)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Le grade de la boiterie	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Le type de fer à poser	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

7. Quelles informations du vétérinaire souhaitez-vous avoir pour réaliser votre choix de ferrure ?

	Oui	Non
Le diagnostic général de « maladie naviculaire » seulement	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Le diagnostic et l'origine de la maladie (osseuse/ligament/tendineuse)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Le grade de la boiterie	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Le type de fer à poser	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
L'ajout de silicone	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Autres :		
.....		

8. Lorsque vous posez des talonnettes ou des fers compensés, combien de temps les laissez vous en place ?

1 ferrure	2 ou 3 ferrures	Plus de 3 ferrures
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

9. Quel délai préconisez vous entre 2 ferrages ?

4 à 5 semaines	6 semaines	7 à 8 semaines	Autres (renseigner le nombre de semaines)
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

10. Comment est ce délai de changement de ferrure par rapport à un cheval sain ferré normalement ?

Plus court	Identique	Plus long
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

11. Ferrez vous les deux antérieurs avec le même type de fer...

- | | Oui | Non |
|---|--------------------------|--------------------------|
| • ...Lorsqu'un seul des antérieurs semble boiteux ? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| • ...Lorsque l'atteinte est bilatérale mais à des grades différents ? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

Partie 2 : Evaluation de l'efficacité de la ferrure

1. Êtes vous souvent amené à changer la ferrure que vous aviez choisie en première intention ?

Jamais	Rarement (1 à 5 cas sur 10)	Souvent (6 à 8 cas sur 10)	Très souvent (9 à 10 cas sur 10)

Lorsque cela vous arrive, pour quelle raison principale effectuez vous ce changement ?

- La boiterie est diminuée et donc vous passez à un fer plus adapté
- La boiterie est au contraire aggravée
- Le fer s'arrache trop souvent
- Coût de la ferrure
(passage à un fer plus classique à la demande du propriétaire)

2. Y-a-t-il un changement que vous effectuez plus particulièrement ?

(Exemple : Fer à l'envers mis à la place d'un egg-bar)

- Oui
- Non
- Si oui, lequel ?

3. Y a-t-il un type de fer qui s'arrache plus souvent qu'un autre ?

- Oui, le fer à l'envers
- Oui, le fers à oignons
- Oui, l'egg-bar
- Non

Si oui, quelles sont vos recommandations pour l'éviter ?

.....

4. De manière générale avez-vous noté une différence d'efficacité suite à l'utilisation de ces 3 types de fers ?

- Oui
- Non
- Si oui, rangez-les par ordre croissant d'efficacité : < <

5. L'amélioration de la boiterie est-elle meilleure selon la catégorie du cheval (loisir/sport/course) ?

- Oui, meilleure chez les chevaux de loisir
- Oui, meilleure chez les chevaux de sport
- Oui, meilleure chez les chevaux de course
- Non, indépendante du type de travail

6. Les chevaux de loisir pris en charge par ce type de ferrure ont-ils pu à terme reprendre l'activité qu'ils avaient avant ?

Non, aucun	Oui, rarement (1 à 5 sur 10)	Oui, souvent (6 à 8 sur 10)	Oui, très souvent (9 à 10 sur 10)

7. Les chevaux de sport/course pris en charge par ce type de ferrure ont-ils pu à terme reprendre l'activité qu'ils avaient avant ?

Non, aucun	Oui, rarement (1 à 5 sur 10)	Oui, souvent (6 à 8 sur 10)	Oui, très souvent (9 à 10 sur 10)

Remarques :

.....

.....

.....

Partie 3 : Informations personnelles

Nom :

Prénom :

Lieu d'exercice :

Lieu et année d'obtention du diplôme de maréchal ferrant :

A quelle catégorie appartiennent majoritairement les chevaux de votre clientèle ?

- Chevaux de loisir (ballades, dressage ou CSO de loisir niveau club)
- Chevaux de sport (en compétition de manière régulière niveau amateur/pro)
- Chevaux de course (trot ou galop)

N° de téléphone portable :

Adresse mail :

(pour pouvoir vous communiquer les résultats ou en cas de questions)

Merci d'avoir pris le temps de répondre à ce questionnaire,
les résultats vous seront communiqués dans le courant de l'année.

Pour toute question vous pouvez me joindre

Par mail : stanislas.dulaudallemand@vetagro-sup.fr

Par téléphone : 06 71 51 38 84

Adresse (pour renvoyer le questionnaire par la poste au besoin) :

399 Chemin de la Madone 69280 Marcy l'Etoile

NOM PRENOM : du LAU d'ALLEMANS Stanislas

TITRE : Etude rétrospective des effets de trois types de ferrures orthopédiques sur la maladie naviculaire à partir d'un questionnaire auprès de maréchaux ferrants.

Thèse d'Etat de Doctorat Vétérinaire : Lyon, le 16 octobre 2015

RESUME : La maladie naviculaire est une affection orthopédique caractérisée par une douleur dans la région palmaire du pied. Elle est due à des lésions dégénératives atteignant l'os naviculaire et la face dorsale du tendon du muscle fléchisseur profond du doigt, mais également la bourse naviculaire et les ligaments sésamoïdiens collatéraux et distal impair. Si l'origine exacte du syndrome naviculaire n'est pas encore élucidée, il est en revanche admis que la biomécanique du cheval joue un rôle primordial dans l'établissement des affections de cette région. Le but de notre travail est de mettre en évidence les choix de ferrures orthopédiques réalisés par les maréchaux ferrants selon la clinique du cheval parmi les fers egg-bar, à oignons et à l'envers. La première partie fait le point sur les connaissances actuelles concernant la maladie naviculaire. La deuxième partie étudie de manière plus approfondie l'importance des phénomènes biomécaniques dans la compréhension de la pathogénie de la maladie et dans l'établissement par la suite d'un traitement orthopédique adéquat. Enfin, la dernière partie est dédiée à l'analyse des réponses au questionnaire des quarante six maréchaux ferrants ayant participé à l'étude. Cette étude a permis de mettre en évidence la ferrure privilégiée par les maréchaux en fonction du grade de boiterie observé, ainsi que les raisons principales de ce choix. Il a de plus été montré que les trois fers étudiés ont chacun des avantages différents qu'il convient d'utiliser pour mettre en place la ferrure la plus adaptée face à la maladie naviculaire. Il est important que maréchal et vétérinaire travaillent de consort pour définir ce qui est le mieux pour le cheval.

MOTS CLES :

- Cheval
- Orthopédie vétérinaire
- Fers à Cheval
- Maladie Naviculaire

JURY :

Président :	Madame le Professeur Elvire Servien
1er Assesseur :	Monsieur le Professeur Olivier Lepage
2ème Assesseur :	Madame le Professeur Caroline Boulocher
Membre invité :	Madame le Professeur Monika Gangl

DATE DE SOUTENANCE : Vendredi 16 octobre 2015

ADRESSE DE L'AUTEUR :

5 Impasse du Camps de César
24660 Coulounieix-Chamiers