



HAL
open science

Biomécanique du pied de bovin : état des connaissances en vue de la réalisation de modèles destinés a l'enseignement

Luca Astarotta

► **To cite this version:**

Luca Astarotta. Biomécanique du pied de bovin : état des connaissances en vue de la réalisation de modèles destinés a l'enseignement. Sciences du Vivant [q-bio]. 2024. dumas-04485714

HAL Id: dumas-04485714

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04485714>

Submitted on 1 Mar 2024

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

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

CAMPUS VÉTÉRINAIRE DE LYON

Année 2024 - Thèse n° 002

BIOMÉCANIQUE DU PIED DE BOVIN : ÉTAT DES CONNAISSANCES EN VUE DE LA RÉALISATION DE MODÈLES DESTINÉS A L'ENSEIGNEMENT

THESE

Présentée à l'Université Claude Bernard Lyon 1
(Médecine – Pharmacie)

Et soutenue publiquement le 20 février 2024
Pour obtenir le titre de Docteur Vétérinaire

Par

ASTAROTTA Luca

CAMPUS VÉTÉRINAIRE DE LYON

Année 2024 - Thèse n° 002

BIOMÉCANIQUE DU PIED DE BOVIN : ÉTAT DES CONNAISSANCES EN VUE DE LA RÉALISATION DE MODÈLES DESTINÉS A L'ENSEIGNEMENT

THESE

Présentée à l'Université Claude Bernard Lyon 1
(Médecine – Pharmacie)

Et soutenue publiquement le 20 février 2024
Pour obtenir le titre de Docteur Vétérinaire

Par

ASTAROTTA Luca

Liste des enseignants du Campus vétérinaire de Lyon au 20/03/2023

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

Remerciements

A Monsieur le Professeur Pierre COCHAT,

De l'Université Claude Bernard Lyon 1, Faculté de médecine de Lyon,
Pour m'avoir fait l'honneur d'accepter la présidence de mon jury de thèse,
Mes hommages les plus respectueux.

A Madame le Professeur Marie-Anne ARCANGIOLI,

De VetAgro-Sup, Campus vétérinaire de Lyon,
Pour avoir encadré ce travail du début jusqu'à la fin,
Pour votre soutien, votre bienveillance et votre disponibilité,
Mes sincères remerciements.

A Monsieur le Docteur Laurent ALVES DE OLIVEIRA,

De VetAgro-Sup, Campus vétérinaire de Lyon,
Pour avoir accepté d'apporter un regard critique et sincère sur ce travail,
Mes sincères remerciements.

A Monsieur Roland ROUME,

De VetAgro-Sup, Campus vétérinaire de Lyon,
Pour votre indispensable aide à la création de ce modèle pédagogique et votre ingéniosité,
Mes sincères remerciements.

Table des matières

Liste des figures	11
Liste des tableaux	15
Liste des abréviations.....	17
Introduction.....	19
Partie 1 Anatomie du pied et propriétés mécaniques de ses composants	21
I. Anatomie du pied : ostéologie et arthro-myologie.....	23
1. Structure osseuse	23
2. Structures musculaires, fascias et gaines	26
a. Région antébrachiale dorsale.....	27
b. Région antébrachiale palmaire	28
3. Structure articulaire : capsules articulaires, ligaments/aponévroses et moyens de fixité	30
a. Articulations métacarpo-phalangiennes (boulet)	30
b. Articulations interphalangiennes proximales	35
c. Articulation interphalangienne distale (articulation du pied).....	36
d. Articulation interdigitale	37
II. Anatomie de la boîte cornée : kératogénèse, enveloppes et structures internes du pied de bovin	38
1. Description générale de la boîte cornée : éléments de sémantique.....	39
2. Le pododerme et la kératogénèse.....	41
a. Le déroulé de la kératogénèse	42
b. Corne tubulaire et corne lamellaire.....	44
3. La muraille.....	46
a. Le périople.....	46
b. La couronne.....	47
4. La sole, le bulbe et les coussinets digitaux	49
a. La sole stricto sensu	50
b. Le bulbe.....	51
c. Les coussinets digitaux.....	52
5. La paroi	56
a. L'appareil suspenseur de P3 (laminar corium)	57
b. La ligne blanche	59
6. Le système vasculaire et nerveux du pied	61
7. Les facteurs influençant la synthèse et la composition de la boîte cornée	64
a. L'âge de l'animal	65

b.	L'alimentation	65
c.	L'humidité et les effluents d'élevage.....	66
d.	Les lésions podales	66
e.	Autres facteurs	66
Partie 2 La biomécanique du pied : cinétique, cinématique, lésions, parage préventif et conception d'un modèle pédagogique		67
I.	Etude cinématique de la démarche du bovin	68
1.	La foulée d'un bovin : caractérisations des phases	68
2.	La phase d'appui : cinématique linéaire et angulaire, biomécanique de la boîte cornée	71
3.	La phase de mobilisation : cinématique linéaire et angulaire et biomécanique du membre.....	74
4.	Intérêts de l'étude cinématique de la démarche d'un bovin : applications dans les élevages	76
II.	Etude cinétique de la démarche du bovin	78
1.	Inventaire des forces s'appliquant sur le pied	78
a.	Les forces externes : les forces de réaction au sol et les frottements.....	78
b.	Les forces actives : forces musculaires et tendineuses.....	80
2.	Etude cinétique de la démarche physiologique du bovin.....	80
a.	Phase 1 : le posé du pied.....	81
b.	Phase 2 : le freinage maximal.....	82
c.	Phase 3 : le soutènement.....	82
d.	Phase 4 : la propulsion maximale.....	82
e.	Phase 5 : le décollage.....	83
f.	Bilan de la phase d'appui physiologique du bovin	83
g.	Cinétique de la phase de mobilisation du pied	84
3.	Cas particulier de la station debout « immobile »	84
4.	Conséquences de la cinétique sur la boîte cornée et ses structures	87
a.	Effets à court terme de la charge du pied.....	87
b.	Effets à long terme de la charge du pied et lésions mécaniques associées.....	89
5.	Perte d'intégrité de l'appareil suspenseur de P3 : conséquences cinétiques et lésions mécaniques associées	93
a.	Fourbure subclinique, cerclage de la muraille, seime cerclée, ouverture de la ligne blanche	93
b.	La période péri-natale.....	95
6.	Variations cinématiques et cinétiques de la marche lors d'une boiterie	96
III.	Le parage préventif : intérêt, principe et conséquences biomécaniques.....	98
1.	Les facteurs de risque des lésions podales	98
a.	Le budget temps et le temps passé debout	98

b.	La rugosité du sol	99
2.	La démarche en pâture : le gold standard des milieux d'évolution	101
3.	La démarche sur sol dur et sur sol souple	102
4.	Objectif et technique du parage préventif danois	104
5.	L'effet du parage préventif fonctionnel sur la biomécanique du pied	106
IV.	Elaboration d'un modèle à visée pédagogique.....	108
1.	Objectifs	108
2.	Matériel et conception	109
a.	Présentation n°1 : anatomie et propriétés mécaniques des composants de l'onglon médial	110
b.	Présentation n°2 : comportement biomécanique de l'onglon latéral et comparaison avec un appui en pince	112
3.	Discussion	115
	Conclusion	117
	Bibliographie	119

Liste des figures

Figure 1 : Terminologie utilisée pour décrire l'anatomie du bovin (dessin d'après P.P.J. van der Tol, photographie personnelle).....	22
Figure 2 : Squelette d'un pied gauche de bovin et lieux d'insertion musculaire (1)	23
Figure 3 : Anatomie de la phalange proximale (1).....	24
Figure 4 : Anatomie de la phalange moyenne (1).....	25
Figure 5 : Anatomie de la phalange distale (1).....	25
Figure 6 : Radiographie d'un pied postérieur gauche d'un veau Holstein d'un an, vue planto-dorsale avec représentation schématique des mesures de longueur (7)	26
Figure 7 : Muscles, fascia digital et gaines digitales du pied de bovin (8).....	27
Figure 8 : Articulations, ligaments, muscles d'un pied gauche de bovin (vue palmaire et latérale) (8).....	32
Figure 9 : Articulations, ligaments, muscles d'un pied gauche de bovin (vue dorsale) (8)	33
Figure 10 : Zone externes du pied, terminologies utilisées en pratique courante.....	38
Figure 11 : Mesures de la boîte cornée (11)	39
Figure 12 : Différences morphologiques entre onglon latéral et médial d'un pied de bovin (14)	40
Figure 13 : Anatomie interne du pied, vue latérale, d'après (3)	41
Figure 14 : A – Epiderme du talon d'un bovin (microscope optique, coloration PAS) B – Vue agrandie montrant les différentes couches cellulaires, ainsi que la représentation schématique des cellules épidermique selon leur stade de différenciation. (17) et (18)	44
Figure 15 : Section histologique de la corne du bulbe perpendiculairement à l'axe du tubule corné (22).....	45
Figure 16 : Différences de morphologies entre les dermes des différentes parties du pied. Microscope électronique (23)	45
Figure 17 : Schéma de l'organisation spatiale du matériel intertubulaire autour des tubules cornés selon la section longitudinale de corne coronale (25).....	48
Figure 18 : Organisation spatiale de la corne coronale d'un pied de bovin. Faces obtenues après fracture provoquée. Microscope électronique. (25)	49
Figure 19 : Face solaire du pied, terminologies anatomiques d'après (3)	50
Figure 20 : Section sagittale d'un pied de bovin montrant les coussinets adipeux. Vue anatomique (à droite, source personnelle) et schématique (à gauche, (30))	52
Figure 21 : Pododerme et hypoderme des segments de la sole et du bulbe après retrait de la boîte cornée et section parallèle à la surface solaire de P3. D'après (30) et (32).....	54
Figure 22 : Section longitudinale de l'extrémité apicale du coussinet adipeux abaxial montrant ses divisions. Onglon postérieur latéral. Coloration H&E. (30).....	54
Figure 23 : Epaisseur moyenne ajustée du coussinet digital des quatre onglons des membres postérieurs selon le mois de lactation, corrélée positivement avec la variation de la Note d'Etat Corporel de l'animal (31)	56
Figure 24 : Correspondance entre la couche superficielle vivante du pododerme (à gauche) et la face interne de la boîte cornée (à droite) en vue latérale après séparation entre corne et pododerme (d'après (23))	57
Figure 25 : Section transverse de l'extrémité distale de la paroi, microscope optique (38)	58
Figure 26 : Structure de la ligne blanche, vue sagittale (3).....	59
Figure 27 : Schéma de la surface du derme pariétal en région distale (38).....	61
Figure 28 : Schéma du réseau artériel d'un pied de bovin. Vue cranio-axiale (gauche) et dorsale (droite) sur un pied postérieur (43)	62

Figure 29 : Schéma du réseau veineux d'un pied de bovin, vue crano-axiale d'un postérieur (à gauche) et image radiographique des vaisseaux du pied en vue dorso-plantaire (à droite) (43) (46)..	63
Figure 30 : Phases de la foulée de l'antérieur gauche d'un bovin (source vidéo : TheSilentWatcher, Youtube).....	69
Figure 31 : Proportions de double et triple support pendant la foulée pour chaque membre (56)	70
Figure 32 : Photographie de la position d'un pied postérieur gauche juste avant le début de la phase d'appui (58)	72
Figure 33 : Décomposition photographique des trois premières phases de l'appui montrant la bascule latéro-médiale du pied (58).....	73
Figure 34 : Cinématique angulaire d'un membre antérieur pendant la phase d'appui (60)	73
Figure 35 : Trajectoires spatiales d'un pied pendant la phase de mobilisation (56)	74
Figure 36 : Représentation schématisée d'un bovin montrant la trajectoire horizontale sigmoïde du postérieur gauche vue du dessus (58)	75
Figure 37 : Evolution de l'angle du pied sur une échelle de zéro à 100 % de la durée totale d'une foulée (62)	76
Figure 38 : Diagramme de corps libre du pied (adapté depuis (75))	79
Figure 39 : Evolution de la force de réaction au sol d'un antérieur et d'un postérieur gauche au cours des cinq phases de la phase d'appui (29).....	80
Figure 40 : Evolution de la distribution des pressions sur la face solaire du pied au cours des cinq phases de phase d'appui (29).....	81
Figure 41 : Distribution de pression mesurée sur un pied postérieur gauche (79).....	85
Figure 42 : Distribution du poids du bovin en station debout sur ses membres postérieurs (400kg) selon différentes hypothèses (adapté d'après (10)).....	86
Figure 43 : Distribution des moyennes des pourcentages de FRS exercées sur les onglons postérieurs lors de la station debout (80)	87
Figure 44 : Evolution de la surface de contact avec le sol et du CDP en fonction de la charge du membre (77).....	88
Figure 45 : Evolution de l'épaisseur des tissus mous entre sol et corne en fonction de la charge du membre (77).....	88
Figure 46 : Variation de la hauteur externe (vert) et interne (jaune) de la sole et de la face solaire de P3 (rouge) d'un onglon latéral postérieur sous l'effet d'une charge minimale (lignes complètes) et d'une charge à 35 % du PV (lignes pointillées) (77).....	89
Figure 47 : Illustration du remplacement progressif du tissu adipeux des coussinets digitaux par du tissu conjonctif et leur diminution de taille sous l'effet de l'enfoncement chronique de P3 dans la boîte cornée (33)	90
Figure 48 : Corrélation de l'épaisseur des tissus mous entre sol et corne avec les zones utilisées pour mieux situer les lésions podales lors de l'appui (77)	91
Figure 49 : Lésions de bleime circonscrite (étoiles) et de bleime diffuse (en rouge clair) sur les deux onglons d'un pied de bovin	91
Figure 50 : Onglon présentant une sole double, en vue latérale après avoir retiré la moitié de la boîte cornée (à gauche), et en vue sagittale après section et retrait de l'apex de l'onglon (48).....	92
Figure 51 : Onglon latéral postérieur présentant un ulcère typique de la sole en zone 4 (source Youtube).....	93
Figure 52 : Cerclage de la muraille (à gauche) et seime cerclée (à droite) sur un onglon de bovin (23)	94
Figure 53 : Apparence histologique de la région lamellaire de la paroi d'un onglon latéral postérieur montrant la distorsion des lamelles dermales, microscope optique avec coloration à l'hématoxyline (78).....	95

Figure 54 : Proportions de double et triple support pendant la foulée pour chaque membre pour des bovins avec des ulcères de sole (56) (à comparer avec Figure 31).....	97
Figure 55 : Angles d'extension relatifs des articulations interphalangiennes sur un pied normal et sur un pied déséquilibré (60)	100
Figure 56 : Pressions (en MPa) exercées sur la boîte cornée en fonction de la rugosité du sol (91) ..	100
Figure 57 : Comparaison du Coefficient de Friction Statique (CFS = 0,3) et du Coefficient de Friction Limite (CFL) entre sol bétonné et pied pour différents comportements (75)	101
Figure 58 : Schéma expliquant l'objectif du parage préventif et son effet sur la forme de la boîte cornée de l'onglon (adapté du site de Nabu Altenburg)	104
Figure 59 : Photographies du contact initial du pied avec le sol en début de phase d'appui avant (a) et après (b) parage préventif (63).....	106
Figure 60 : Distribution de la pression sur un pied postérieur gauche d'un bovin avant (a) et après (b) parage fonctionnel danois (104).....	107
Figure 61 : Vue d'ensemble du modèle pédagogique (source personnelle).....	109
Figure 62 : Couches de l'onglon médial séparées (à gauche) et assemblées (à droite) (source personnelle)	111
Figure 63 : Différentes vues des tissus podaux en face solaire avant et après retrait successif de couches (de la gauche vers la droite) (source personnelle).....	112
Figure 64 : Vue latérale du modèle pédagogique (source personnelle).....	113
Figure 65 : Biomécanique du modèle de pied selon différents appuis (source personnelle).....	114

Liste des tableaux

Tableau 1 : Valeurs cinétiques spatiales et temporelles physiologiques de la foulée d'un bovin (55, 56, 58-62)	71
Tableau 2 : Echelle de score de boiterie selon les critères proposés par Sprecher et al (1997) (84)	96

Liste des abréviations

PG : Postérieur Gauche

PD : Postérieur Droit

AG : Antérieur Gauche

AD : Antérieur Droit

PV : Poids Vif

P1 : Phalange proximale

P2 : Phalange médiale

P3 : Phalange distale

IPP : (Articulation) Interphalangienne Proximale

IPD : (Articulation) Interphalangienne Distale

CDP : Centre De Pression

FRS : Force(s) de Réaction au Sol

CFL : Coefficient de Friction Limite

CFS : Coefficient de Friction Statique

CFD : Coefficient de Friction Dynamique

S.s. : stricto sensu (au sens strict)

S.l. : sensu lato (au sens large)

INTRODUCTION

Depuis trente ans, l'étude de la biomécanique du pied de bovin revêt une importance capitale. Elle a montré que la **forte augmentation de l'incidence des boiteries** pouvait être associée à l'**augmentation du temps passé sur des sols artificiels**, parfois pendant toute la vie de l'animal, au détriment du milieu naturel d'origine que constitue la prairie herbacée.

Les **lésions podales** qui découlent de ces conditions de vie ont un impact néfaste sur le bien-être, la santé, et la productivité des animaux : la chute de production laitière et les déficits de reproduction associés mènent à des **réformes** anticipées et des **coûts financiers** considérables pour les éleveurs. La **biomécanique du pied** s'intéresse essentiellement aux lésions **d'origine non infectieuse** qui résultent de contraintes excessives sur le pied. Sa mauvaise conformation, son usure anormale liée à l'environnement de vie ou aux conditions d'élevage intensif provoquent des lésions d'origine mécanique. Elles ont fait l'objet de nombreuses études qui ont permis de **mieux en comprendre les causes et les facteurs de risques**. Ces études permettent au vétérinaire de développer des stratégies de prévention et de traitement adaptées. Il est en conséquence pertinent pour les étudiants vétérinaires de **disposer d'un outil de simulation** qui intègre la structure anatomique complexe du pied de bovin pour comprendre **l'influence de la biomécanique** sur ces structures ainsi que les **principes du parage fonctionnel**.

La présente thèse, intitulée "**Biomécanique du Pied de Bovin : État des Connaissances en Vue de la Réalisation de Modèles Destinés à l'Enseignement**", se propose de faire un point sur les connaissances actuelles et d'en faire une synthèse en mettant l'accent sur les **aspects fonctionnels et pathologiques**. La première partie examine en détail l'anatomie et la structure du pied de bovin et la synthèse de la corne du sabot, en mettant en lumière leurs propriétés mécaniques ainsi que les éléments pouvant les modifier. La seconde partie explore les **aspects mécaniques fonctionnels du pied**, notamment lors de la locomotion, en étudiant les contraintes auxquelles il est soumis en fonction de son environnement et leurs **conséquences**. Elle se termine par l'étude du **parage préventif fonctionnel**, puis détaille la conception du modèle pédagogique.

Nous avons donc élaboré **un modèle synthétique** pour les étudiants en médecine vétérinaire afin **d'améliorer leur compréhension de la biomécanique du pied**, en leur permettant d'en visualiser les structures internes et leurs rapports. Les lésions infectieuses du pied ne sont pas abordées dans cette thèse, ni leur rapport avec la conformation de ce dernier.

PARTIE 1

ANATOMIE DU PIED ET PROPRIETES

MECANIQUES DE SES COMPOSANTS

Le pied de bovin est une extrémité divisée en **deux doigts distincts** séparés par un **espace interdigité étroit**, et enveloppés d'une enveloppe cornée, **l'onglon ou boîte cornée** recouvrant la troisième phalange (1).

Cette partie décrit dans un premier temps **l'anatomie structurelle du pied** à travers une étude **ostéologique** et **arthro-myologique**. Puis dans un second temps, elle détaille **la boîte cornée** à travers ses **propriétés intrinsèques, sa synthèse**, les **différents types de cornes et structures internes remarquables** qui la composent dont **le système vasculaire et nerveux** du pied. Cette partie se termine en exposant les principaux facteurs qui influencent la nature de boîte cornée.

Il faut pour commencer rappeler l'usage de quelques **termes spécifiques** qui permettront de comprendre les descriptions anatomiques (**Figure 1**). Les membres à l'avant de l'animal sont des membres antérieurs, ceux à l'arrière des membres postérieurs ou pelviens. Les **termes directionnels** indiqués **prennent le membre du bovin comme référence** : par exemple, le terme « dorsal » désigne la face du membre visible par un observateur se tenant face à face avec un bovin et non la partie supérieure de l'animal. Le terme « ventral » est remplacé par « palmaire » ou « plantaire » selon le membre pour désigner la face opposée à la face dorsale. Les termes « proximal » et « distal » désignent respectivement des éléments proches du corps de l'animal ou proches du sol. Enfin, le plan transverse permet de définir les structures proches de plan comme structures « axiales » et inversement les structures éloignées comme « abaxiales », « latérales » si elles sont éloignées du plan médian du membre, « médiales » dans le cas inverse (2).

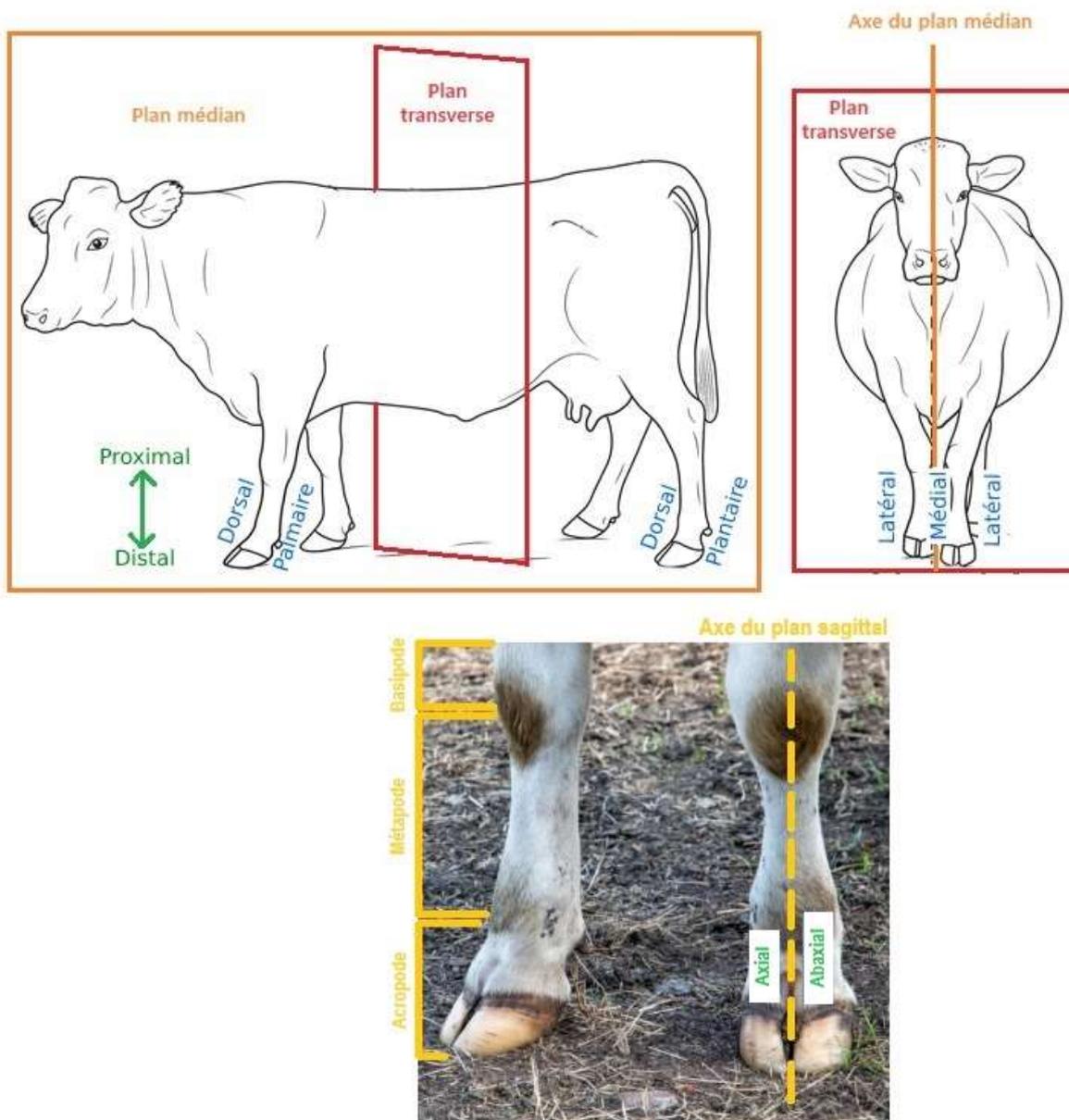


Figure 1 : Terminologie utilisée pour décrire l'anatomie du bovin (dessin d'après P.P.J. van der Tol, photographie personnelle)

Les termes directionnels sont indiqués en vert, les termes relatifs aux faces des membres sont indiqués en bleu.

En **anatomie stricte**, la « main » d'un antérieur (respectivement « pied » pour un postérieur) désigne **trois segments**, le **carpe** (resp. tarse) ou basipode, le **métacarpe** (resp. métatarse) ou métapode et le **doigt** avec ses trois phalanges ou acropode. Dans le cadre du sujet de cette thèse, **seul le segment acropode sera étudié** et désigné sous le terme de « pied antérieur » ou « pied postérieur ».

Chaque pied comporte **deux ergots** ou *para-ungula* en région postéro-inférieure du carpe, séparés par une dépression cutanée. Ce sont des **vestiges des doigts II et IV**, constitués par une production cornée conique reposant sur une petite pièce ostéo cartilagineuse et qui ne sont attachés aux doigts que par des ligaments. **Ils n'ont pas de rôle particulier dans la locomotion** et ne seront pas plus détaillés.

I. Anatomie du pied : ostéologie et arthro-myologie

Cette partie étudie la **base structurelle du pied** à travers sa **structure osseuse** constituée par les **phalanges et les os sésamoïdes**, les **tendons des muscles** qui s'y attachent et les **articulations** entre les os du pied et avec l'os canon.

1. Structure osseuse

Les doigts sont les appendices osseux mobiles et libres qui terminent le pied (1) (3) (4). Au nombre de deux, un doigt III médial et un doigt IV latéral, ils sont **chacun composés de six pièces osseuses** de tailles différentes dont **trois phalanges** et dont les reliefs constituent des zones d'attaches des divers tendons, ligaments et capsules du pied (**Figure 2**).

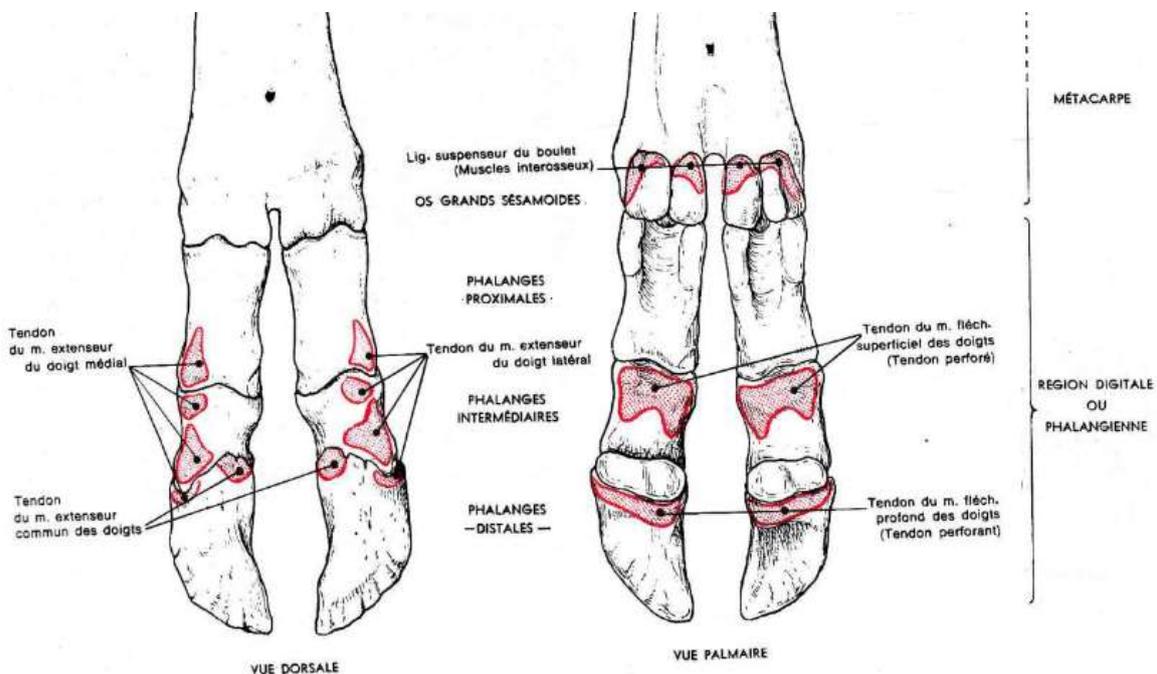


Figure 2 : Squelette d'un pied gauche de bovin et lieux d'insertion musculaire (1)

La phalange proximale (P1) ou os du paturon, est un os long dont le corps forme un parallélépipède rectangle aplati dans le sens dorso-palmar. **Sa face dorsale** est convexe, **sa face palmaire** est légèrement concave et rugueuse. **Ses bords** sont épais et arrondis, son bord axial est particulièrement large et recouvert de rugosités. **Son extrémité proximale** (ou base) s'articule avec l'os métacarpien (os canon) à travers deux surfaces articulaires inégales séparées par une gorge dorso-palmar qui correspondent à une configuration opposée de l'os canon. Cette extrémité comporte en face palmaire deux tubercules d'insertion ligamentaire latéraux qui s'articulent avec les **sésamoïdes proximaux**. **Son extrémité distale** est rétrécie, elle présente deux condyles séparés par une gorge peu profonde, l'abaxial étant plus grand que l'axial (**Figure 3**).

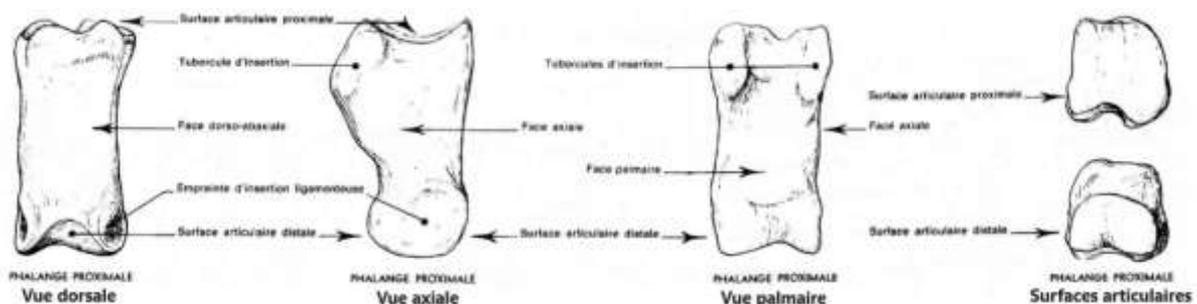


Figure 3 : Anatomie de la phalange proximale (1)

Les sésamoïdes proximaux ou grands sésamoïdes (deux par doigts) sont de petits os situés en position palmaire à l'extrémité proximale de P1. Ils s'articulent entre eux à travers leur **face axiale** formant une poulie de glissement tendineux et à leur **face articulaire** concave avec l'os canon. Le sésamoïde proximal abaxial est plus volumineux, l'axial est plus allongé (**Figure 2**).

La phalange moyenne (P2) ou "phalange" ou os de la couronne, est un os court dont le **corps** forme un cube convexe en **face dorsale** et aplati en **face palmaire**. La surface de P2 est entièrement rugueuse sauf sur ses **faces latérales**. Son **extrémité proximale** comporte deux surfaces articulaires concaves séparées par un relief répondant à P1, ainsi qu'un petit relief dorsal rugueux (**processus extensorius de P2**). Elle comporte également en **face palmaire** un relief transversal (**torus palmaire**) qui s'étend en tubercules à ses extrémités, qui borde l'articulation avec P1. Ce relief est complété par une formation fibro-cartilagineuse nommée **scutum moyen** (ou **bourrelet glénoïdal**). Son **extrémité distale** est semblable à celle de P1, comme montré en **Figure 4**.

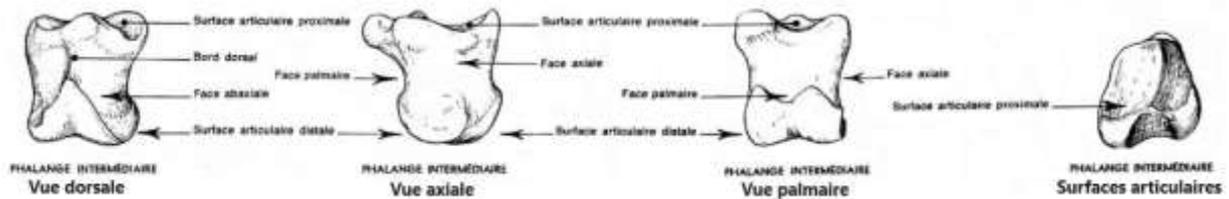


Figure 4 : Anatomie de la phalange moyenne (1)

La phalange distale (P3) ou phalange unguéale est un os court et étiré en forme de pyramide (Figure 5) Son **bord palmaire** constitue une **face solaire, horizontale**, qui répond à la sole du sabot et limite un **bord solaire semi-parabolique** dans sa partie abaxiale. Elle est rugueuse et comporte de petits orifices, ainsi qu'un petit relief palmaire. Son **bord dorsal** s'épaissit en même temps que l'apex s'élargit. **Sa face dorsale** ou pariétale est convexe et, tout comme sa **face axiale**, est criblée de foramens vasculaires, de diamètre croissant plus ils sont proches du bord solaire. **Sa face axiale** est plate et sa **face abaxiale** convexe. La phalange distale s'articule avec P2 à travers une surface constituée de deux cavités séparées par un relief dorso-palmaire **sagittal** prolongé dorsalement en **processus extensorius ou éminence pyramidale**. Coté palmaire, un relief épais, le **tuberculum flexorium**, est percé de part et d'autre par de gros orifices vasculaires constituant le **foramen solaire** qui se poursuit par un **canal intraosseux très développé**.

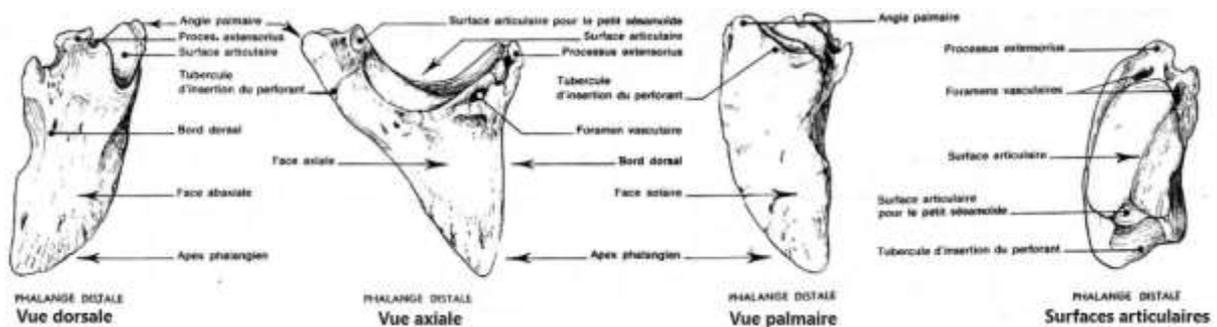


Figure 5 : Anatomie de la phalange distale (1)

L'os sésamoïde distal, ou petit sésamoïde ou os naviculaire distal (un par doigt), situé en face palmaire, s'articule par sa **face dorsale** avec l'extrémité distale de P2 et son **bord distal** est en regard de P3. C'est un petit os dont les **faces axiales et abaxiales** sont légèrement convexes, formant un **relief sagittal** qui prolonge celui de P3 ainsi qu'une **face palmaire lisse (facies flexoria)**.

Il n'existe **aucune différence de longueur** des os des phalanges **entre le doigt latéral et le doigt médial** d'un même onglon, pour un antérieur ou un postérieur. Cependant, la **surface solaire de l'onglon latéral** d'un pied est **plus distale** que celle de **l'onglon médial**. Le **condyle latéral de l'os canon** qui s'articule avec l'extrémité proximale de P1 est **légèrement plus long** que le condyle médial (5) (6) : ainsi, **le doigt latéral apparaît plus long que le doigt médial**, ce qui est visible dans les différences conformation externe des doigts (**Figure 6, Figure 10**).

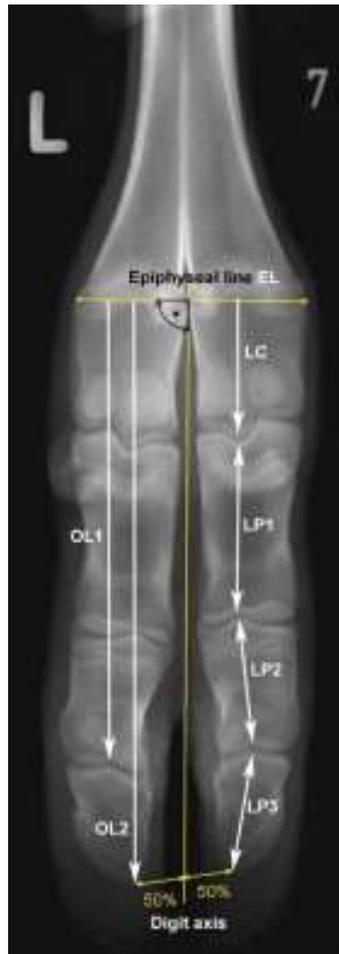


Figure 6 : Radiographie d'un pied postérieur gauche d'un veau Holstein d'un an, vue planto-dorsale avec représentation schématique des mesures de longueur (7)

2. Structures musculaires, fascias et gaines

Le pied de bovin ne comporte **aucun muscle à corps charnu**, bien qu'au sens strict, il comporte 2 structures nommées « muscles interosseux métacarpiens III et IV » (*mm. Interossei digiti III et IV*) qui ne sont composés que de tissu fibreux, formant ensemble le **ligament suspenseur du boulet**, détaillé dans la partie relevant des articulations (8).

La **face palmaire des phalanges** est recouverte en regard de chaque articulation de **surfaces de glissement** pour les tendons musculaires (3) : le **scutum proximal** à la jonction métacarpo-phalangienne, le **scutum moyen ou bourrelet glénoïdal** à l'articulation entre P1

et P2 et le **scutum distal** à l'articulation entre P1 et P2. Leur composition est détaillée dans la partie concernant les ligaments.

Nous détaillons ici les muscles ayant des **points d'attache tendineux sur le pied** selon les mouvements qu'ils permettent, principalement **l'extension** (région antébrachiale dorsale) et **la flexion** (région antébrachiale palmaire). Ces muscles sont exposés **pour un antérieur (Figure 7)**, l'organisation du postérieur est semblable.

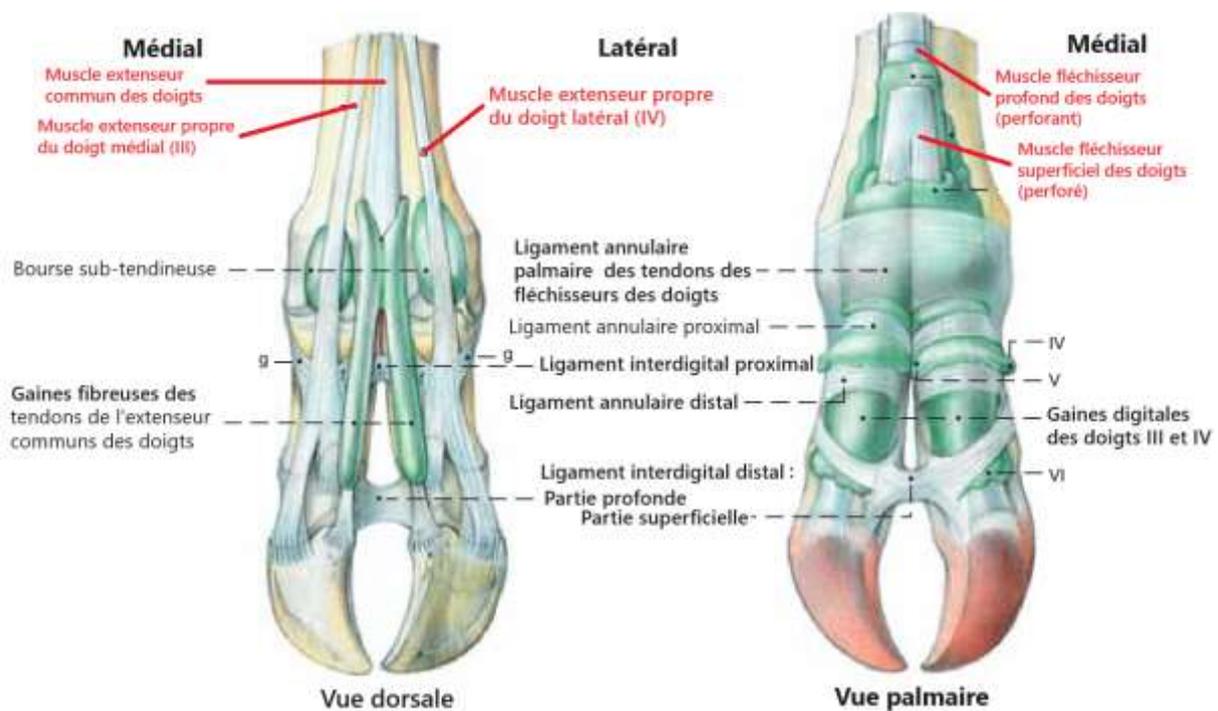


Figure 7 : Muscles, fascia digital et gaines digitales du pied de bovin (8)

Le fascia dorsal n'est pas visible sur la vue dorsale.

a. Région antébrachiale dorsale

La région antébrachiale dorsale comporte **trois muscles extenseurs du pied antérieur**, constitués de corps charnus allongés prolongés dans la région du pied par des tendons fibreux. Ils sont entourés du **fascia dorsal**.

Le muscle extenseur commun des doigts (Figure 7, vue dorsale) prend attache sur l'humérus et au niveau du coude. Son tendon chemine dorsalement et **se divise en deux branches à la face dorsale de l'articulation du boulet**. A ce niveau, chacune de ces branches s'engage dans une **gaine fibreuse** au bord axial du doigt dont la synoviale communique avec son homologue via un récessus proximal. Elles divergent ensuite en direction distale et **chaque branche se termine sur le processus extensorius de P3** de chaque doigt. La contraction du **muscle extenseur commun des doigts** provoque **l'extension** et **l'adduction** (rapprochement) des doigts.

Les muscles extenseurs propres des doigts forment deux tendons indépendants de celui de l'**extenseur commun de doigts**. Ils n'ont pas de gaine propre : ils sont simplement recouverts du **fascia dorsal**.

Le muscle extenseur propre du doigt médial (III) prend attache sur l'**humérus** et son tendon chemine dorsalement jusqu'à la face dorsale de l'articulation du boulet sur laquelle il glisse grâce à une petite **bourse sub-tendineuse**. Il s'élargit dans sa progression distale, reçoit deux branches du **ligament suspenseur du boulet** et se divise en deux branches distalement à P1 :

- **Une branche dorsale courte** et épaisse qui couvre l'articulation P1-P2 et se termine sur le **processus extensorius de P2**
- **Une branche abaxiale plus large**, prend une direction abaxiale, recouvre le ligament collatéral correspondant, adhère à P2 et s'attache sur l'ensemble du **bord abaxial de P3**

Le muscle extenseur propre du doigt latéral (IV) prend attache sur le coude, le radius et l'ulna ; son tendon chemine latéralement jusqu'à l'articulation du boulet où il se divise et se comporte comme celui du **doigt médial**. Lorsqu'ils se contractent, les **extenseurs propres des doigts** provoquent l'**extension** et l'**abduction** (écartement) de ces doigts.

Enfin, le **fascia dorsal** du pied antérieur prolonge le fascia antébrachial à partir du carpe. D'abord constitué de 2 lames, seule la lame superficielle très mince recouvre les **tendons extenseurs des doigts** et les sépare de la peau.

b. Région antébrachiale palmaire

La région antébrachiale postérieure comporte deux **puissants muscles fléchisseurs** des phalanges les unes sur les autres à l'origine de la flexion du pied.

Le muscle fléchisseur superficiel des doigts ou perforé (Figure 7, vue palmaire) descend de l'humérus et forme un seul tendon palmaire au milieu du métacarpe avant de se **diviser en deux branches** qui se portent chacune vers un doigt à hauteur de l'articulation métacarpo-phalangienne. A ce niveau, chaque branche forme en association avec la terminaison du **ligament accessoire ou bride carpienne** (correspondant au renforcement du fascia recouvrant le perforant, le séparant ainsi du perforé), un anneau (**manica flexoria**) traversé par le **muscle fléchisseur profond des doigts ou perforant**. Ces 2 branches du **perforé** s'unissent faiblement par une lame fibreuse transversale sous le **tendon fléchisseur profond des doigts** et se terminent sur le **scutum moyen de P2**. La contraction de ce muscle permet la **flexion** de P2 sur P1.

Le muscle fléchisseur profond des doigts ou perforant prend origine en 3 branches sur l'humérus et le radius, et se poursuit par un **tendon unique en région métacarpienne**. Il **se divise en 2** au niveau des os sésamoïdes proximaux, chaque branche passe alors dans l'anneau du **perforé** grâce auquel elle est maintenue dans une **gaine digitale** décrite ci-après. Le **perforant** devient alors **superficiel en face palmaire** mais séparé de la peau et des coussinets digitaux par un système de **brides annulaires** issues du **fascia digital**. Enfin, le perforant glisse sur le scutum moyen et s'élargit au niveau de P2 en une « aponévrose palmaire » épaisse : celle-ci glisse sur la face palmaire de l'os sésamoïde distal via une bourse subtendineuse qui réduit les frictions et vient se terminer sur le **tuberculum flexorium de P3**.

Les tendons des fléchisseurs des doigts sont maintenus d'une part par les **branches proximales du ligament interdigital proximal** (décrit plus loin) et les bandelettes de suspension des **coussinets digitaux** (reliant les osselets de l'ergot à la face abaxiale du bulbe du coussinet digital).

Le **fascia palmaire** assure la contention de l'ensemble. Il est composé de deux lames :

- La lame profonde s'unit aux **ligaments palmaires** des articulations du boulet et constitue en partie le scutum proximal. Elle est recouverte par les **tendons fléchisseurs**.
- La lame superficielle donne au niveau de l'articulation du boulet un **fascia digital** qui, avec la face palmaire des **phalanges** et les **scutums**, forme les **gainnes digitales**. Les **gainnes digitales** permettent le glissement des **tendons fléchisseurs des doigts** sur la face postérieure de P1 et des sésamoïdes proximaux. Chacune de ces gainnes comporte trois fortes brides fibreuses annulaires transversales renforcées (**Figure 7**) :
 - La **bride proximale** (la plus large, de 4 cm) est située en regard du scutum proximal et de la partie adjacente de P1. Elle s'attache à la face abaxiale de l'os sésamoïde proximal abaxial et s'unit dans le plan axial à la bride proximale de l'autre doigt pour former le **ligament annulaire palmaire**. Ce ligament s'attache avec le **ligament intersésamoïdien interdigital** et la face adjacente des os sésamoïdes proximaux axiaux.
 - La **bride moyenne** forme le **ligament annulaire digital proximal** (largeur 3 cm) qui relie les bords de la face palmaire de P1
 - La **bride distale** forme le **ligament annulaire digital distal** qui relie les côtés du scutum moyen et de l'extrémité proximale de P2. Elle est recouverte par le **ligament interdigital distal**.

Au sein de cet ensemble contentif, chaque doigt possède une synoviale qui aide au glissement des tendons fléchisseurs, notamment sur la bride carpienne du perforé proximale et sur le scutum distal distalement.

3. Structure articulaire : capsules articulaires, ligaments/aponévroses et moyens de fixité

Le pied comporte **deux articulations métacarpo-phalangiennes, cinq articulations interphalangiennes et une articulation interdigitale** (8). A l'exception de cette dernière, ce sont toutes des **articulations synoviales de type condyloïde ou charnières imparfaites**, opposant une surface convexe (condyle) à une surface concave (cavité glénoïde). Ce type d'articulation est spécialisé dans les mouvements de **flexion** et **d'extension** et plus modérément de **glissement** et de **latéralité**. Ces articulations et les ligaments associés sont présentés dans la **Figure 8** et la **Figure 9**. **Dans cette partie, les nombres entre crochets renvoient aux éléments numérotés de ces figures.**

a. Articulations métacarpo-phalangiennes (boulet)

Les **articulations métacarpo-phalangiennes** (ou articulation du **boulet**) sont au nombre de deux par pied. Elles mettent en rapport **l'extrémité distale du métacarpe principal**, les **extrémités proximales de P1** et les **surfaces articulaires proximales des quatre sésamoïdes proximaux**. Les moyens d'union sont constitués par une capsule articulaire renforcée par les ligaments sésamoïdiens et métacarpo-phalangiens et complétée par les muscles interosseux et leurs insertions.

La capsule articulaire [1], unique, est formée de deux synoviales (une par doigt) communiquant largement du côté palmaire. Chacune tapisse la face profonde des **ligaments collatéraux** et de la **capsule fibreuse**. Elle s'étend au-delà de l'articulation par un récessus dorsal peu important et un récessus palmaire plus vaste, palmaire par rapport aux **ligaments intersésamoïdiens** et **sésamoïdo-phalangien** et qui remonte entre les branches du **muscle interosseux** et l'extrémité distale du métacarpe.

Les ligaments sésamoïdiens impliquent les sésamoïdes proximaux :

- Les **ligaments intersésamoïdiens** brefs et très épais, en face palmaire
 - Deux sont propres [2], unissent les bords adjacents des deux os sésamoïdes et les recouvre entièrement en face palmaire, formant le **scutum proximal**, surface de glissement des **tendons fléchisseurs du doigt**
 - Un est interdigital [3] et occupe l'espace axial entre les deux os sésamoïdes

- Les **ligaments sésamoïdiens collatéraux**, courtes bandelettes fibreuses en face palmaire. On dénombre par doigt :
 - Un abaxial [4] qui unit le tubercule palmaire latéral de P1 au sésamoïde proximal abaxial correspondant et s'étend via quelques fibres jusqu'au métacarpe
 - Un axial plus réduit
- Les **ligaments sésamoïdo-phalangiens distaux**, profonds en face palmaire. On dénombre par doigt :
 - **Deux croisés [5]**, unissant la base des os sésamoïdes proximaux au tubercule opposé de l'extrémité proximale de P1
 - **Deux courts [6]**, un axial et un abaxial (plus distinct), qui unissent la base de chaque sésamoïde à l'extrémité proximale de P1
- Les **ligaments sésamoïdo-phalangiens interdigitaux [7]** : ils relient la base de chaque sésamoïde axial au tubercule axial et à la face palmaire de P1 opposée (donc ils se croisent dans le plan axial).

Les ligaments métacarpo-phalangiens (ou métacarpo-digitaux) sont représentés par **les ligaments collatéraux, symétriques**. Par doigt, on dénombre :

- **Un abaxial [8]** reliant les faces abaxiales du métacarpe et de l'extrémité proximale de P1
- Un axial [9] s'insérant avec celui de l'autre doigt à l'échancrure interarticulaire du métacarpe et rejoignant P1 en se mêlant aux fibres des **ligaments interdigitaux proximaux**

L'articulation est **renforcée par deux structures complémentaires** :

- Le **renforcement dorsal de la capsule articulaire**, épaissement fibro-cartilagineux entre les **ligaments collatéraux abaxiaux** et les marges articulaires du métacarpe et des deux P1 : il participe à la formation des **gaines digitales** des **tendons extenseurs des doigts** et à leur glissement.

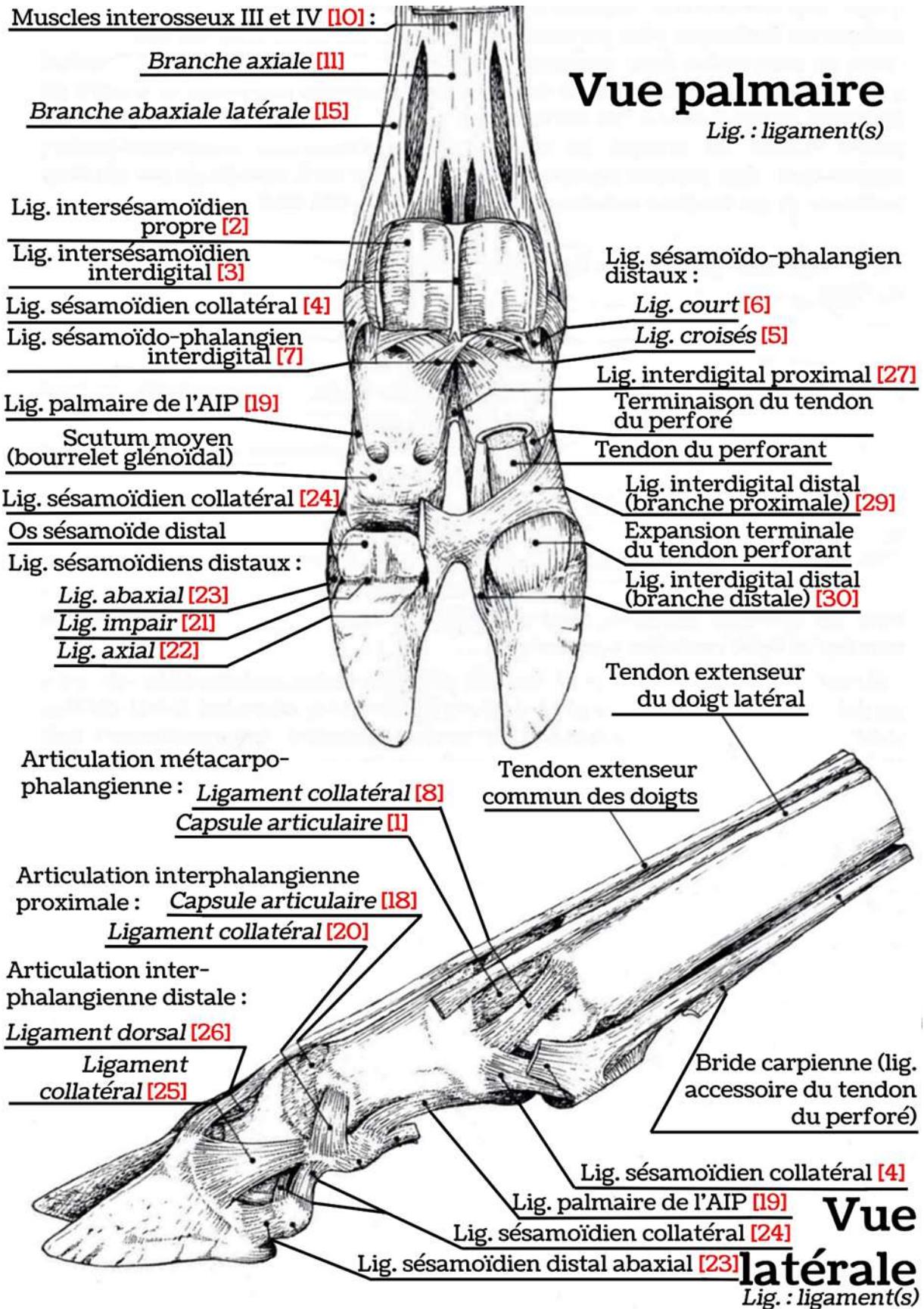
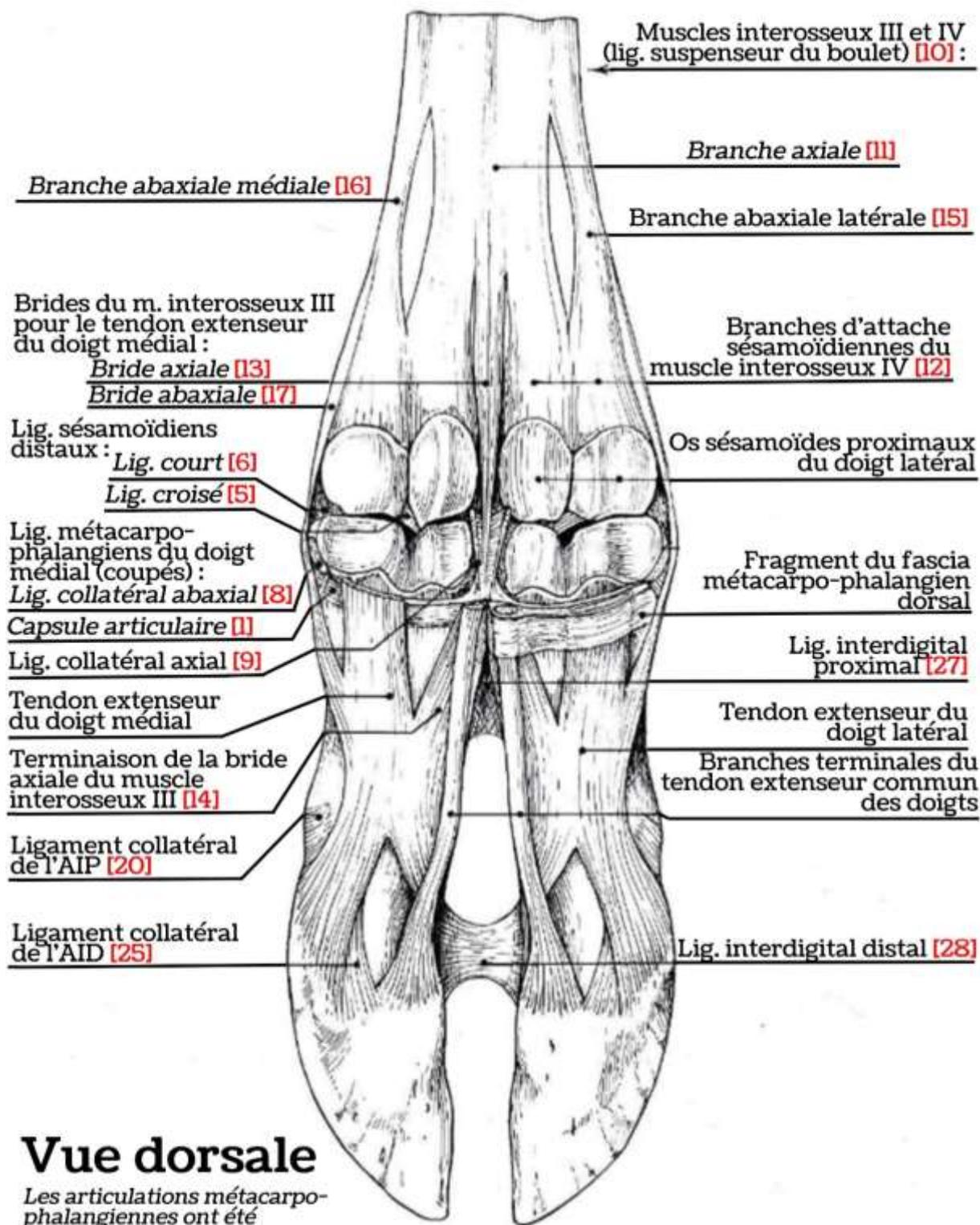


Figure 8 : Articulations, ligaments, muscles d'un pied gauche de de bovin (vue palmaire et latérale) (8)



Vue dorsale

Les articulations métacarpo-phalangiennes ont été désarticulées.

Lig. : ligament(s)

Figure 9 : Articulations, ligaments, muscles d'un pied gauche de de bovin (vue dorsale) (8)

- Le **ligament suspenseur du boulet [10]**, qui résulte de la fusion des **muscles interosseux des doigts III et IV**. C'est une longue et puissante corde entièrement fibreuse, épaisse, plate et large, située en face palmaire. Il s'insère sur le carpe et l'extrémité proximale du métacarpe et chemine distalement en étant uni à sa face palmaire avec la **bride carpienne** : celle-ci le sépare des **muscles fléchisseurs des doigts** jusqu'à la moitié du métacarpe où elle s'isole pour former les anneaux du **perforé**. Il se divise en trois à l'extrémité distale du métacarpe :
 - **La branche axiale** (la plus large) [11] : elle donne deux branches d'attaches axiales sésamoïdiennes [12] aux sésamoïdes proximaux axiaux. En progressant distalement dans l'axe, elle est renforcée par les faisceaux fibreux des deux **ligaments collatéraux axiaux**. Puis elle forme une épaisse lame sagittale [13] dorsalement au **ligament interdigital proximal** avec lequel elle échange des fibres. Enfin, elle se divise à la moitié de P1 en deux lames [14] qui s'éloignent de l'axe et rejoignent chacune dorsalement le **tendon extenseur propre de chaque doigt**.
 - **Les deux branches abaxiales** (latérale [15] et médiale [16]) : chacune se divise en deux pour donner une branche [12] s'attachant au sommet des sésamoïdes proximaux et une branche plus fine qui chemine en face abaxiale [17], se lie partiellement avec le **ligament collatéral** correspondant et rejoint également le **tendon extenseur propre du doigt**

Les mouvements possibles de cette articulation sont :

- **La flexion** : le doigt est entraîné en direction palmaire, P1 et les sésamoïdes glissent en un bloc sur la surface condyloïde du métacarpe. Les sésamoïdes butent sur la face palmaire du métacarpe, ce qui limite le mouvement.
- **L'extension**, par un mécanisme inverse. Le mouvement est limité par la tension sur les os sésamoïdes (entraînés distalement), la tension sur le ligament suspenseur du boulet et les tendons fléchisseurs.
- De très faibles **mouvements de latéralité** limités par la tension du **ligament collatéral** opposé ; lors de leur relâchement (pied en flexion), ces mouvements sont plus marqués.

b. Articulations interphalangiennes proximales

L'**articulation interphalangienne proximale** unit P1 à P2. Les moyens d'union sont constitués par une capsule articulaire renforcée par un ligament palmaire et des ligaments collatéraux et complétée par les tendons extenseurs et fléchisseurs.

La **capsule articulaire** [18] est mince mais renforcée dorsalement dans sa partie médiane où elle adhère au **tendon extenseur du doigt**, ainsi qu'en face palmaire où elle participe à la formation du **scutum moyen**. La synoviale comporte un récessus dorsal sous la **capsule fibreuse** et les **tendons extenseurs**, dirigé vers l'extrémité distale de P1, ainsi qu'un récessus palmaire qui remonte au **scutum moyen** sous la terminaison du **tendon fléchisseur superficiel du doigt**.

Le **ligament palmaire** [19] est puissant et complexe. Ses extrémités axiales et abaxiales unissent l'extrémité distale de P1 à l'extrémité correspondante du **scutum moyen**, qui constitue sa partie moyenne. L'ensemble assure le soutien de ce **scutum** et donc complète l'action du **tendon fléchisseur superficiel du doigt**.

Les **ligaments collatéraux** sont inégaux. Pour chaque doigt, ils sont :

- En face axiale, plus forts et s'étendent de la partie moyenne et distale de P1 au revers axial de l'extrémité proximale de P2 et de son tubercule palmaire. A leur bord dorsal, ils sont parallèles au plan superficiel du **ligament collatéral axial de l'AID**, plus étroit et plus long (décrit ci-dessous)
- En face abaxiale [20], plus étroits et obliques et unissent les condyles de l'extrémité distale de P1 au revers abaxial du tubercule palmaire de P2 en descendant plus ou moins sur le bord correspondant

De façon complémentaire, cette articulation est renforcée en face dorsale et abaxiale par les **tendons extenseurs des doigts**, qui adhèrent à la **capsule** et à la face dorsale de P1 et P2. Elle est renforcée en face palmaire par les **tendons fléchisseurs des doigts**.

Les mouvements possibles de cette articulation sont :

- **La flexion**, assez limitée : P2 glisse en direction palmaire par l'action du **muscle fléchisseur superficiel du doigt** via le **scutum moyen**, dont la butée contre la face palmaire de P1 (et la tension des **tendons extenseurs des doigts**) limite le mouvement
- **L'extension** : le mouvement inverse se produit et c'est la tension des **ligaments** et **tendons fléchisseurs** sur le **scutum moyen** qui limite le mouvement

- Des mouvements latéraux et de pivotement de faible amplitude, plus visibles en flexion, et forcément indirectement induits

c. *Articulation interphalangienne distale (articulation du pied)*

L'articulation interphalangienne distale unit P2, P3 et l'os sésamoïde distal. Les surfaces articulaires sont similaires à celle de l'articulation proximale. Les moyens d'union incluent une **large capsule articulaire** renforcée par les **ligaments palmaires (ou sésamoïdiens), collatéraux et dorsaux**.

La capsule articulaire intègre une synoviale plus étendue que l'articulation proximale. Celle-ci forme un récessus dorsal sous le **tendon extenseur propre des doigts**, un récessus palmaire proximal plus vaste qui remonte contre la face palmaire de P2 (jusqu'à sa moitié) proximale à l'os sésamoïde distal et un petit diverticule entre l'os sésamoïde et P3.

Les ligaments sésamoïdiens sont multiples :

- **Les ligaments sésamoïdiens distaux** rattachent l'os sésamoïde distal à P3. Au nombre de 3, l'un impair [21] très bref et solide relie les bords adjacents de l'os sésamoïde et du *tuberculum flexorium* de P3, les 2 autres (axial [22] et abaxial [23]) relient l'extrémité de l'os sésamoïde distal à la face correspondante de P3.
- **Les ligaments sésamoïdiens collatéraux** (un axial, un abaxial [24]) suspendent l'os sésamoïde distal via deux faisceaux, l'un court au revers palmaire du corps de P2, l'autre long à l'extrémité proximale de P2, de façon symétrique

Les ligaments collatéraux sont divisés en axiaux et abaxiaux :

- Le **ligament collatéral axial**, divisé en deux plans
 - Son plan superficiel s'insère sur P1 (dorsalement à l'insertion du **ligament collatéral axial de l'AIP**) et se termine à la face axiale de P3, proche de la surface articulaire.
 - Son plan profond s'insère à l'extrémité distale de P2, devient oblique en direction disto-palmaire et se termine sur la face axiale de P3, sous la surface articulaire
- Le **ligament collatéral abaxial** [25] prolonge l'**extenseur propre du doigt** par sa face palmaire, s'attachant à l'extrémité proximale de P2 jusqu'à la surface articulaire de P3, proche du processus *extensorius*

Le ligament dorsal [26] est faible et élastique. Il unit la partie proximale du bord dorsal de P2 au processus *extensorius* de P3 entre la terminaison de **l'extenseur commun des doigts** et celle du **ligament collatéral axial**.

De façon complémentaire, cette articulation est également renforcée, coté dorsal par la terminaison du **tendon extenseur commun des doigts** et l'expansion du **tendon de l'extenseur propre du doigt**, coté palmaire par l'élargissement du **tendon du fléchisseur profond des doigts** sur le **scutum distal**, et enfin par le **ligament interdigital distal** (cf après).

Les mouvements possibles de cette articulation sont :

- **La flexion**, qui porte P3 en direction palmaire
- **L'extension**, très limitée
- La latéralité et le pivotement, importants dans l'appui normal du sabot même si le sol est irrégulier

d. Articulation interdigitale

L'articulation interdigitale n'est composée que de **deux ligaments interdigitaux**.

Le ligament interdigital proximal [27] est **très puissant** et épais. Il est formé de **faisceaux fibreux courts entrecroisés** reliant les **deux P1** entre elles à l'extrémité proximale de leur face axiale. Il est renforcé par des fibres des **ligaments collatéraux axiaux** des articulations du **boulet** et la **bride interdigitale du ligament suspenseur du boulet**. Il participe au **soutien de l'articulation du boulet**.

Le ligament interdigital distal [28], plus large et superficiel, est formé de **fibres entrecroisées dans l'espace interdigital**, en face palmaire des doigts et au-dessus des sabots. Il **protège les vaisseaux et nerfs digitaux palmaires axiaux**. Il est recouvert à sa face palmaire d'un fascia sous-cutané puis de la peau et **soutient un coussinet adipeux** interdigital à sa face dorsale. Il est composé de **quatre branches** (deux par doigts) :

- **La branche proximale [29] plus longue**, unit la face axiale de **P3** à la face abaxiale de l'extrémité distale de **P1** ; cette branche recouvre et renforce le **tendon fléchisseur profond du doigt** en le **plaquant contre P3**, à la façon d'une gaine fibreuse.
- **La branche distale [30] plus courte**, attache la face axiale de **P3** et l'extrémité axiale de **l'os sésamoïde distal**. Elle se confond avec l'expansion terminale du tendon fléchisseur profond du doigt, le coussinet digital et le pododerme.

Les ligaments interdigitaux ont pour rôle commun de **soutenir les doigts en s'opposant à leur écartement sous l'effet du poids du corps lors de l'appui**.

II. Anatomie de la boîte cornée : kératogénèse, enveloppes et structures internes du pied de bovin

Les structures osseuses et tissus mous de la région du pied sont enveloppés en partie distale par un **tégument kératinisé** constituant une **enveloppe cornée** insensible, non irriguée et dure à rôle protecteur : **la boîte cornée (ou onglon, sabot)** (4) (9). Faisant **suite au paturon et à la couronne** (ou bande coronaire) qui représente sa limite supérieure, l'onglon est **divisé extérieurement en plusieurs zones (Figure 10)** : la **muraille** qui constitue sa partie dorsale, le **talon** en arrière du pied, la **sole** désignant la partie en contact avec le sol et séparé de la muraille par la **ligne blanche**, l'**apex** désignant la partie la plus distale du bord solaire d'un onglon et **la pince** qui désigne la partie antérieure du pied.



Figure 10 : Zone externes du pied, terminologies utilisées en pratique courante.

Ces structures externes cornées sont **synthétisées par les tissus élaborateurs sensibles des différents téguments** de l'onglon. Ces derniers forment d'une part le **pododerme**, à l'origine de la **production de cornes spécifiques** dont le rôle est de **protéger les structures internes de l'onglon**, d'autre part des **tissus spécialisés** à rôle majeur dans la **biomécanique du pied** : les **coussinets adipeux** situés entre les os et le pododerme et **l'appareil suspenseur de P3**.

Cette partie étudie précisément l'anatomie de l'onglon et ses propriétés mécaniques. Elle débute par une **description générale** donnant quelques **éléments de sémantique**. Elle aborde ensuite le **processus de la kératogénèse** à l'origine de la boîte cornée puis décrit **l'organisation et les spécificités des différents tissus élaborateurs** de la muraille et de la sole, la **structure particulière du bulbe** avec le **coussinet digital** et enfin celle de la **paroi** avec **l'appareil suspenseur de P3** et la **ligne blanche** (10). Elle se termine par la description du **système vasculaire et nerveux du pied** et les facteurs pouvant influencer la forme et la composition de la boîte cornée.

1. Description générale de la boîte cornée : éléments de sémantique

La forme de l'onglon épouse celle de la phalange distale qu'il contient. La morphologie de l'onglon est déterminée par plusieurs valeurs mesurables (**Figure 11**).

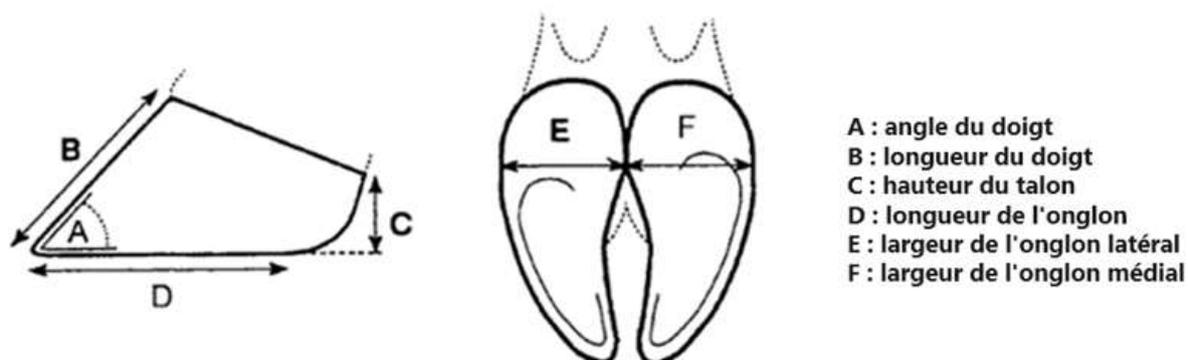


Figure 11 : Mesures de la boîte cornée (11)

La muraille (**Figure 10**) constitue la partie dorsale, axiale et abaxiale de la boîte cornée (12) (13). Elle détermine un angle avec la surface solaire appelé **angle du doigt** (ou angle dorsal ou angle de l'onglon) (**Figure 11**, A) d'environ 47 à 55°. Sa longueur en bordure dorsale détermine la **longueur du doigt** (**Figure 11** B) mesurée du périopile à la pince : elle est comprise entre 7 et 8 cm.

La partie postérieure de l'onglon est caractérisée par la **hauteur du talon** (**Figure 11** C), verticale entre la couronne postérieure du pied et le sol de 2,8 à 4,4 cm.

La sole constitue l'essentiel de la **surface plantaire** de la boîte cornée. Elle détermine la **largeur de l'onglon** (**Figure 11** E pour le latéral, F pour le médial) entre la muraille axiale et abaxiale, ainsi que la **longueur de l'onglon** (ou longueur de la sole, **Figure 11** D) correspondant à la longueur de la muraille en zone abaxiale (depuis la pince jusqu'au bulbe en contact avec le sol).

La forme de la boîte cornée dépend de nombreux facteurs dont l'âge, le poids, et la race (14). Sur un même animal, **elle est différente entre l'onglon médial et l'onglon latéral : l'onglon latéral est plus gros que l'onglon médial pour les membres postérieurs, et inversement pour les antérieurs (Figure 12)**. Les onglons postérieur et antérieur présentent également des différences notables, au niveau de leur forme à l'échelle individuelle, de leur caractéristiques histologiques, physiques et biochimiques, et consécutivement vis-à-vis de l'incidence des affections podales : **les onglons antérieurs sont moins susceptibles d'être atteints que les onglons postérieurs.**

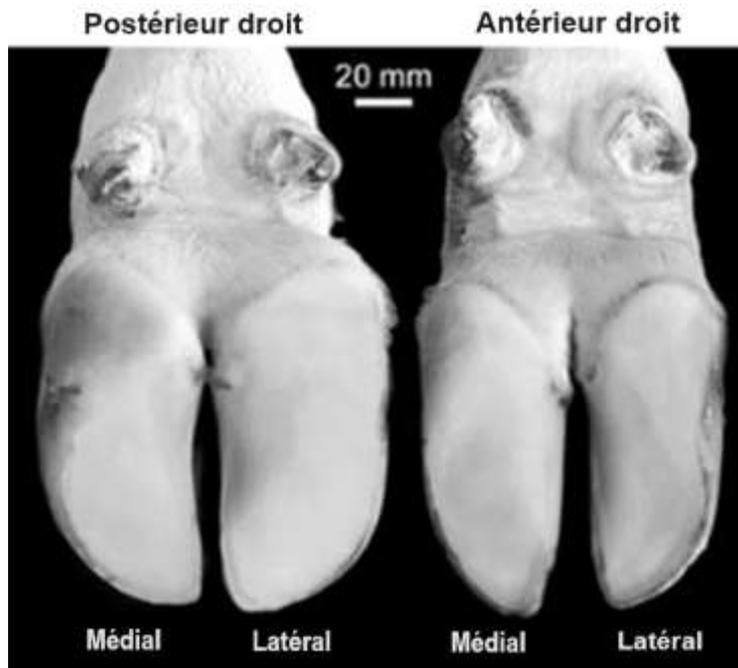


Figure 12 : Différences morphologiques entre onglon latéral et médial d'un pied de bovin (14)

La boîte cornée est un **composite biologique de matériel kératinisé** qui s'adapte et résiste à différentes contraintes **sans déformation excessive ou rupture totale**. Les tissus cornés ont des **propriétés mécaniques propres** dont l'étude est essentielle pour comprendre le **comportement de ces tissus** lorsqu'ils sont **soumis à une contrainte** (15). Ainsi, on caractérise un tissu corné à travers **deux propriétés principales** (16):

- **La rigidité.** Elle est déterminée par le **module d'élasticité** (ou module de Young), grandeur intrinsèque définie par le **rapport entre une contrainte et la déformation élastique qu'elle provoque**. La valeur de ce module détermine la rigidité de la corne : **s'il est élevé, alors une contrainte élevée ne provoque que peu d'allongement relatif et la corne est dite rigide** ; à l'inverse, **s'il est faible, la corne est dite souple**. Dans le cadre de ce travail, le module d'élasticité est mesuré à travers la **résistance à la compression de la corne**.
- **La dureté.** Elle définit la **résistance de la corne à la pénétration par un objet plus dur**, souvent un caillou. Ainsi, sur une **corne dure**, un **caillou pénètre sur une faible longueur et laisse une petite empreinte** ; c'est l'inverse pour une **corne peu dure**. **L'usure d'un tissu corné n'est possible que sur un sol de dureté plus élevée** : toutes choses égales par ailleurs, **plus la dureté du tissu corné est élevée, moins il s'use facilement**.

Enfin, les structures externes visibles de l'onglon sont à **différencier des téguments qui le compose**, au nombre de **cinq** : le **périople** élaborant la couche la plus superficielle de la muraille, la **couronne** formant l'essentiel de la muraille, la **paroi** visible uniquement en surface solaire où elle forme la ligne blanche, le **bulbe** élaborant la corne du talon et de la sole *sensu lato* et la **sole stricto sensu** élaborant seulement la corne à l'apex ; ces deux derniers constituent la face solaire et plantaire de l'onglon (**Figure 13**). Ces téguments ont une **organisation analogue** à celle de la **peau** (épiderme, derme, hypoderme) mais ils sont chacun **spécialisés** dans la synthèse **d'un élément corné unique** : leur **composition anatomique** et leurs **propriétés mécaniques** sont différentes et seront détaillés dans leur partie dédiée.

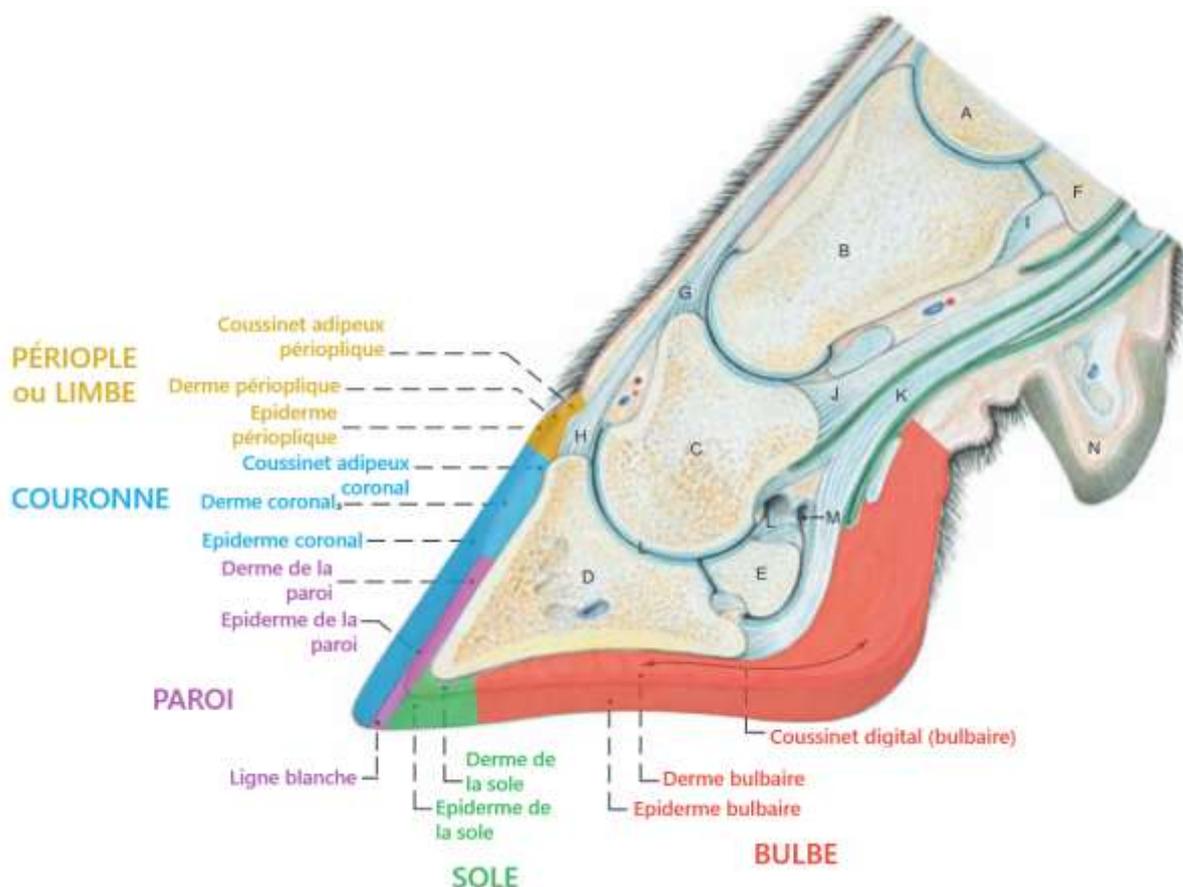


Figure 13 : Anatomie interne du pied, vue latérale, d'après (3)

2. Le pododerme et la kératogénèse

Le **pododerme** (synonymie : membrane kératogène, corium, vif) désigne le **derme et l'épiderme richement vascularisés et innervés qui élaborent de la corne**. Il recouvre l'hypoderme et est recouvert de la corne, qui en est issue.

Le pododerme se décompose en **deux couches** :

- La couche dermique, réticulaire, profonde, est constituée d'un système de fibres de collagènes ; elle apporte la vascularisation à la région basale de l'épiderme
- **La couche épidermique** (17), **germinative**, superficielle, se présente sous forme de surface **papillaire** (dans tous les segments du pieds) ou **lamellaire** (correspondant à la paroi). C'est un **site de division cellulaire par mitose** qui représente la 1^{ère} étape de la kératogénèse.

Chaque segment du pied possède un **pododerme spécifique** à l'origine d'une corne spécifique synthétisée lors de la kératogénèse.

a. Le déroulé de la kératogénèse

La **kératogénèse** désigne le **processus de création et de transformation de cellules vivantes** hautement fonctionnelles en **cellules cornées** programmées pour **mourir**, stables et sans aucune activité métabolique (10) (18). La **couche germinative superficielle épidermique du pododerme module et contrôle cette production** : son **intégrité est indispensable**.

Le composant principal de la corne est la **kératine**. Derrière ce terme se cache en réalité un **complexe de protéines** qui prennent la forme de **filaments** ou de **substance intermédiaire amorphe**. Leur synthèse est dépendante des **apports sanguins** de la couche germinative en énergie, nutriments, minéraux et la régulation par les hormones

La kératogénèse se déroule en quatre étapes qui correspondent macroscopiquement à quatre niveaux cellulaires différents (**Figure 14**) (17).

1/ La prolifération

La prolifération désigne la **formation de cellules épithéliales** formant le « **stratum basale** » de l'épiderme, par **mitose** sur la couche germinative du pododerme. Après la mitose, une cellule reste dans la membrane basale tandis que l'autre est **poussée distalement** vers la couche plus externe. Le **métabolisme** de ces cellules est **hautement spécialisé** dans la **production intra-cellulaire de kératine** (d'où leur appellation **kératinocytes**). Le cytoplasme des cellules du « *stratum basale* » contient peu de protéines de kératine.

2/ La différenciation/kératinisation

Les couches cellulaires recouvrant le « *stratum basale* » **s'enrichissent de cette prolifération permanente** de cellules qui se différencient progressivement vers l'extérieur. Le « **stratum spinosum** » est composé d'une centaine de couches de cellules. Les couches les plus internes synthétisent rapidement les protéines composant la kératine, elles s'élargissent

et prennent une **forme polygonale**. Elles synthétisent également la **substance intercellulaire** composée de lipides. Plus les cellules progressent vers la surface, plus leur cytoplasme s'enrichit en protéines de kératine au détriment des autres organites de la cellule. Au tiers supérieur du stratum spinosum, la **substance intercellulaire est exocytée**.

3/ La fin de la kératinisation

La couche suivante est le « **stratum granulosum** ». Là, le kératinocyte est entièrement **différencié/mature** : il s'aplatit, sa membrane s'épaissit, tous ses organites dont le noyau disparaissent et les **filaments de kératine prennent tout l'espace cellulaire**, sont assemblés via des **ponts sulfurés** en « cross-linking » reliés au cytosquelette de la cellule (19). Ce sont ces liaisons qui sont à l'origine de la **dureté** de la corne : **plus la distance** entre le lieu de kératinisation et la surface de la corne **est élevée**, plus ces lésions sont importantes et **plus la corne est rigide** (20).

4/ La cornification

La **cornification** débute au moment où la cellule est **déclarée morte** : parallèle à la surface, elle est **reliée avec les autres cellules** par des jonctions intracellulaires et la **substance intercellulaire** qui joue le rôle de ciment. Cet ensemble forme la couche la plus superficielle de la corne, le « **stratum corneum** ». Cette **couche la plus externe** protège la corne et les structures sous-jacentes de l'action d'éventuelles enzymes protéolytiques bactériennes (19). La cornification est un **processus définitif** puisque la corne est un **matériau biologique mort** : en conséquence, **toute lésion de la corne à ce moment** (ponts disulfures insuffisants) **est irréparable** et la corne non remodelable jusqu'à son usure naturelle (11). Ainsi, la boîte cornée est un matériau **peu résilient**.

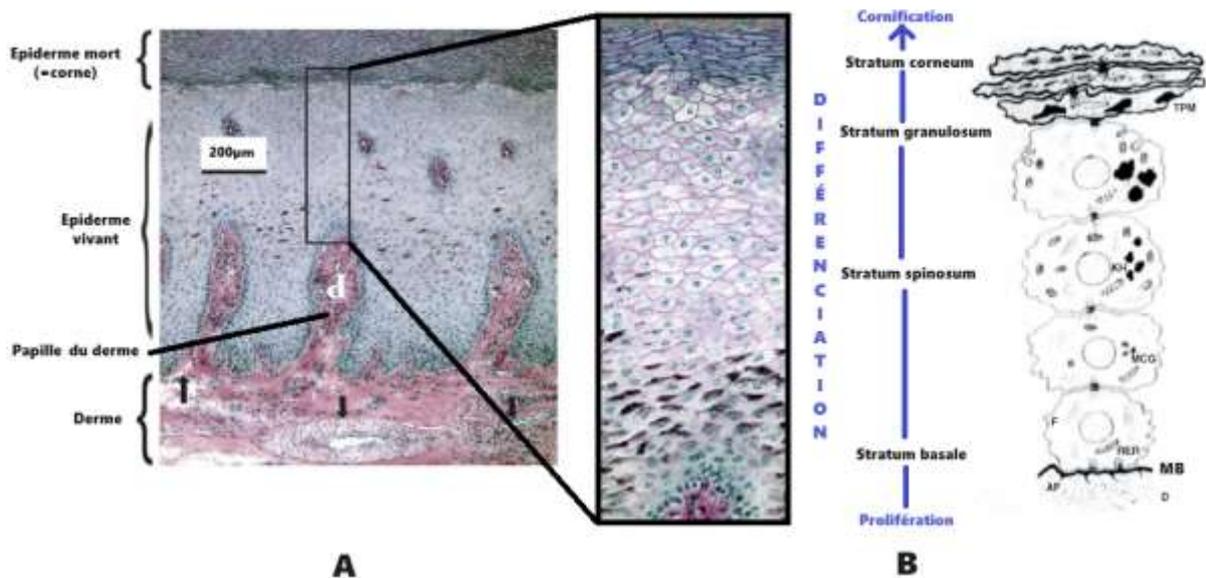


Figure 14 : A – Epiderme du talon d’un bovin (microscope optique, coloration PAS) B – Vue agrandie montrant les différentes couches cellulaires, ainsi que la représentation schématique des cellules épidermique selon leur stade de différenciation. (17) et (18)

A - Les flèches montrent le riche système vasculaire du derme dont certains vaisseaux entrent dans la papille du derme. B - Depuis la membrane basale (MB), les cellules s’enrichissent en substance intercellulaire progressivement exocytée (MCG) et en filaments (F) et granules (KH) de kératine. Lors de la cornification, les cellules s’aplatissent, perdent leur noyau et sont remplies de masses de kératine homogène.

b. Corne tubulaire et corne lamellaire

La kératogénèse est un **processus complexe** de production de tissu corné. Mais la corne n’est pas un matériau uniforme. Sa **composition spatiale**, de laquelle découle ses propriétés, dépend avant tout de la **morphologie de la couche germinative**, à l’origine de 2 grands types de cornes.

La corne tubulaire est présente **dans toutes les régions de l’onglon**. Synthétisée par un derme comportant des **papilles**, elle est composée de **tubules de corne inclus dans la corne de base**. Ces tubules sont constitués d’un **cortex** synthétisé par le pododerme qui entoure les papilles (qui leur donne leur forme de tubule) et d’une **médulla** synthétisée par le pododerme **au sommet de la papille (Figure 15)**. Les tubules sont **parallèles** et de **forme hélicoïdale** dans toutes les régions où ils sont synthétisés. Leur morphologie les **rend plus solides que la corne intertubulaire** qui les entourent. Ils agissent à la façon d’un **ressort en absorbant l’impact** (21).

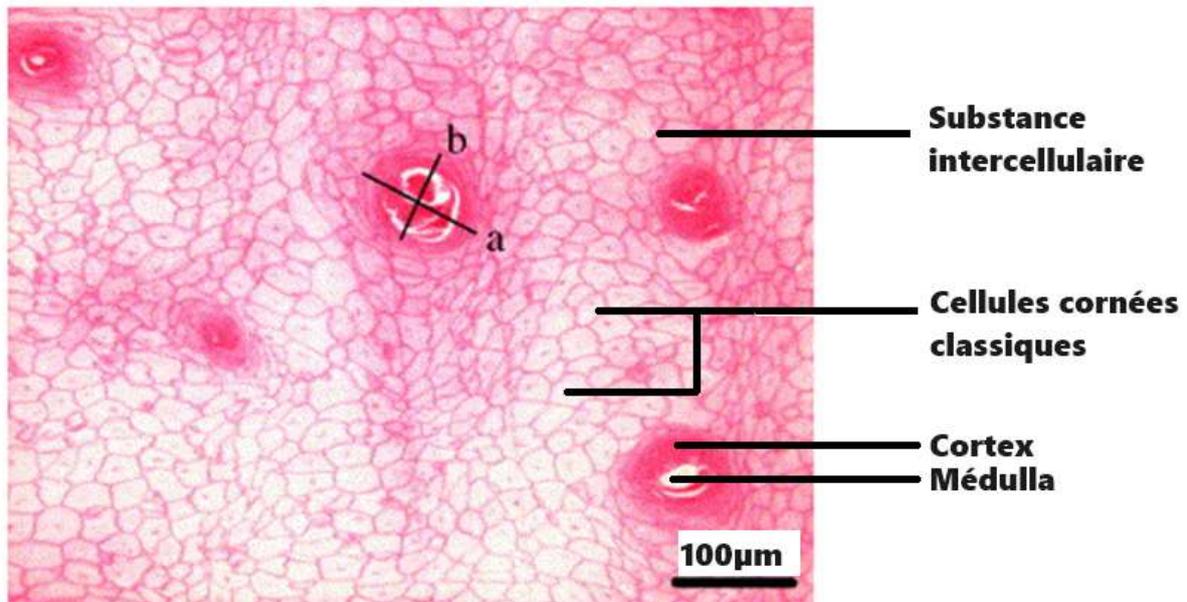


Figure 15 : Section histologique de la corne du bulbe perpendiculairement à l'axe du tubule corné (22)

La **corne lamellaire** est présente uniquement dans la région élaborant la **corne de la paroi** (Figure 16). Le derme lamellaire est soit **simple**, soit **surmonté de papilles** qui produisent de la corne tubulaire. Les lamelles de corne lamellaires participent à la constitution de la **ligne blanche** et de l'**appareil suspenseur de P3**.

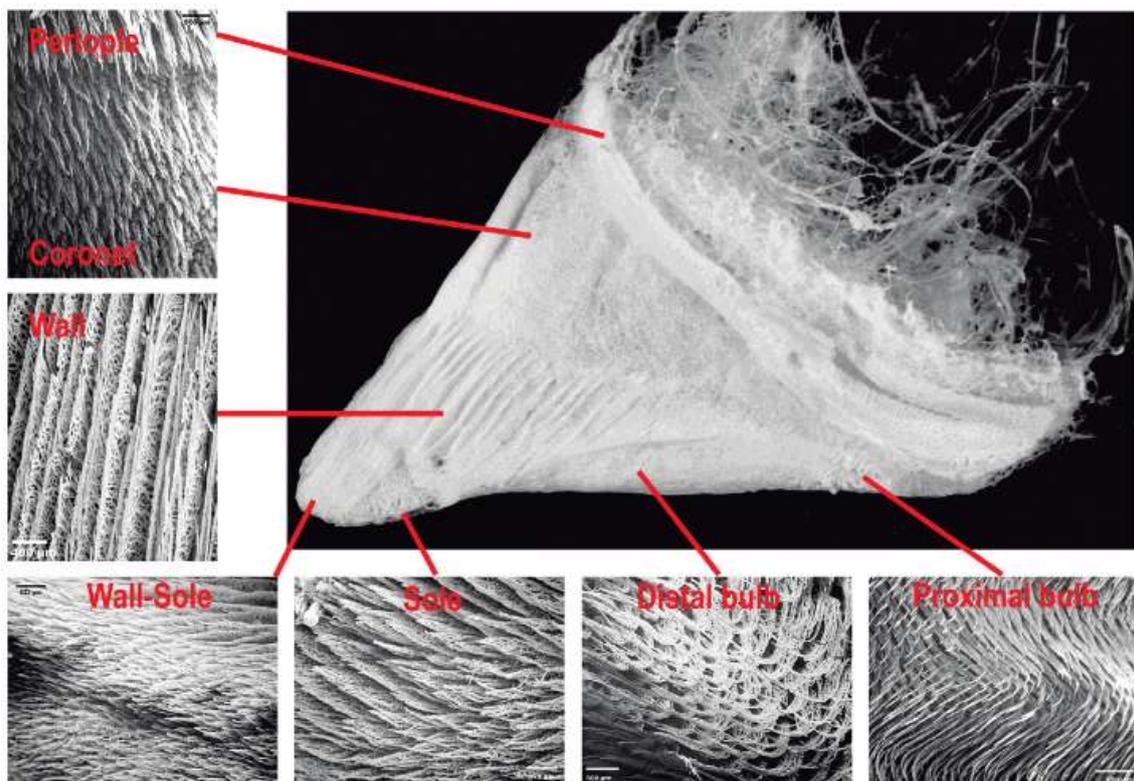


Figure 16 : Différences de morphologies entre les dermes des différentes parties du pied. Microscope électronique (23)

Le diamètre, le ratio entre cortex et médulla, la densité de tubules, leur angle au sein de la boîte cornée, ainsi que l'organisation spatiale entre corne tubulaire, corne intertubulaire et corne lamellaire et leurs proportions relatives sont les déterminants de la dureté et de la rigidité de la corne (21) (22). D'autres facteurs l'influencent tels que la race et la pigmentation de la corne (24) (11) (19). L'association de chaque tissu corné constituant l'onglon permet une complémentarité de leurs propriétés mais entraîne également l'apparition de zones de transition et donc de fragilité (15). **Chaque élément de la boîte cornée est détaillé ci-après.**

3. La muraille

La muraille (ou lamina ou *Paries corneus* ou horny wall) est formée de l'**union de trois cornes issues d'épidermes différents** (18) : le **périople**, la **paroi** et la **couronne**. La muraille peut se diviser en **muraille axiale et abaxiale** (elle-même divisée en dorsale et latérale). Elle se distingue de la corne du talon par un **sillon abaxial**.

Étant donné ses différences structurelles et son importance fonctionnelle, **la paroi sera décrite séparément**. Le pododerme de la muraille étant situé au niveau de la couronne du pied, on le nomme **bourrelet coronaire**.

a. Le périople

Le périople (ou limbe) est le segment le plus proximal du pied, faisant la jonction entre la peau poilue du membre et la boîte cornée (zone de la couronne) (3). Il est visible extérieurement sous la forme d'un **bourrelet** (bourrelet périoplé, bourrelet limbique) d'un centimètre de largeur faisant le tour du pied.

- **L'hypoderme** du périople se compose d'un **coussinet limbique** légèrement convexe en face dorsale et abaxiale (absent en face axiale). Il s'étend jusqu'à la surface palmaire du pied où il s'élargit et est continu avec le **coussinet digital du bulbe (Figure 13)**.
- **Le derme** du périople recouvre l'hypoderme. Il est séparé du derme du **bulbe** par un **sillon abaxial** vertical. Sa surface est constituée de **fines papilles** de 2 mm de longueur, assez espacées et orientées vers l'extrémité distale du pied
- Le derme du périople est recouvert de **l'épiderme** à l'origine de la **corne périoplé** (stratum externum) formée de **tubules cornés** orientés vers l'extrémité distale du pied (10).

La corne du périople est une **corne tubulaire très fine** et composée de kératine « douce » (17), ce qui en fait une **corne avec un faible degré de consolidation** qui a

tendance à desquamer. Elle correspond à la **cuticule des doigts chez l'Homme**. La corne du périople n'est jamais en contact avec le sol : **son usure se fait par écaillage** (10). C'est une corne de **dureté et de rigidité faibles** : elle **protège l'extrémité proximale du segment coronal** qu'elle recouvre. Lorsque sa teneur en eau est élevée, elle apparaît particulièrement **enflée**.

b. La couronne

La couronne constitue la couche intermédiaire **la plus épaisse et la plus solide** de la muraille. Elle est **distale au segment périoplé**.

- **L'hypoderme coronal** est peu développé : il est formé d'un **coussinet coronal** légèrement convexe et dont l'épaisseur en face axiale et abaxiale diminue en direction palmaire.
- **Le derme coronal** fait suite au derme du périople. Sa surface est constituée de **papilles coniques** à extrémité arrondie dont la base se projette horizontalement mais dont **l'extrémité s'incline vers l'extrémité distale, dans la sens de croissance de la corne**. Leur densité est élevée (80 par mm²) (18).
- **L'épiderme coronal (*stratum medium*)** s'étend bien **au-delà de la surface du derme coronal** par la corne élaborée jusqu'à la surface solaire du pied. Elle constitue la face dorsale, axiale et abaxiale de la boîte cornée. **Sa longueur détermine la longueur du doigt**. Elle comporte des **stries parallèles** orientées dans le sens de synthèse de la corne et qui divergent légèrement en se rapprochant du talon. Elle est recouverte dans sa partie proximale par la corne du périople (10)

La corne coronale est une corne tubulaire très **dure et rigide** dont les couches sont très cohésives, ce qui lui confère une **grande résistance aux forces de tensions** qui lui sont appliquées (17). Il faut en moyenne **8 à 10 semaines** pour que la corne synthétisée par la couche germinative atteigne le sol (11). Elle est constituée d'alpha kératine très résistante sous la forme de deux éléments principaux (25) :

- Les **tubules** : d'un diamètre de 200 à 300µm, ils sont formés d'une cavité médullaire de faible diamètre (20-50µm) et d'une paroi formée de multiples lamelles de **filaments intermédiaires (composés de microfibrilles dans les kératinocytes (26))**, entrelacées les unes avec les autres, leur assurant une **forte cohésion et empêchant les délaminations**. Les tubes sont orientés parallèlement à la surface de la muraille et apportent la rigidité et la force de la corne dans la direction axiale

- Le **matériel intertubulaire** sous forme de lamelles de 3 à 7 μm d'épaisseur délimitant **trois sections longitudinales** de cornes de structure et de fonction différentes (**Figure 17, Figure 18**) :
 - La **section externe** est une structure en **lames parallèles aux tubules** qui forment une **multitude d'interfaces pouvant absorber et amortir une grande quantité d'énergie** et éviter la propagation de fractures de la corne
 - La **section intermédiaire** est une structure plus désorganisée « **en vaguelettes** » avec des pics et des creux, qui forment un angle variable de 30-60° avec les tubules : elle **diffuse la force qui s'y applique** et **absorbe l'énergie de déformation extérieure**, ce qui en fait un des matériaux biologiques les plus résistants aux fractures (20)
 - La **section interne** apparaît **plus lisse et perpendiculaire** aux tubules. C'est une **couche de transition** qui protège le pododerme sous-jacent

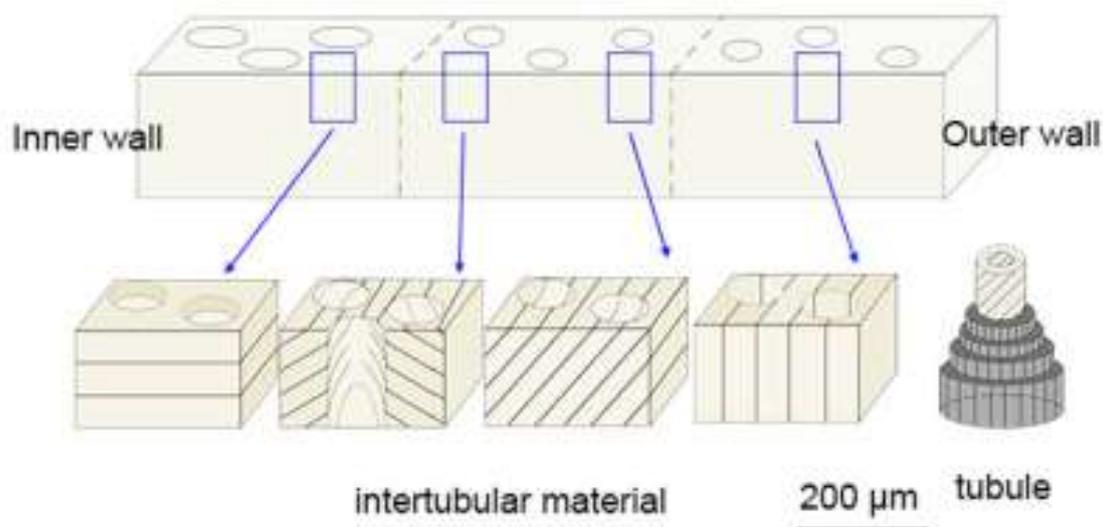


Figure 17 : Schéma de l'organisation spatiale du matériel intertubulaire autour des tubules cornés selon la section longitudinale de corne coronale (25)

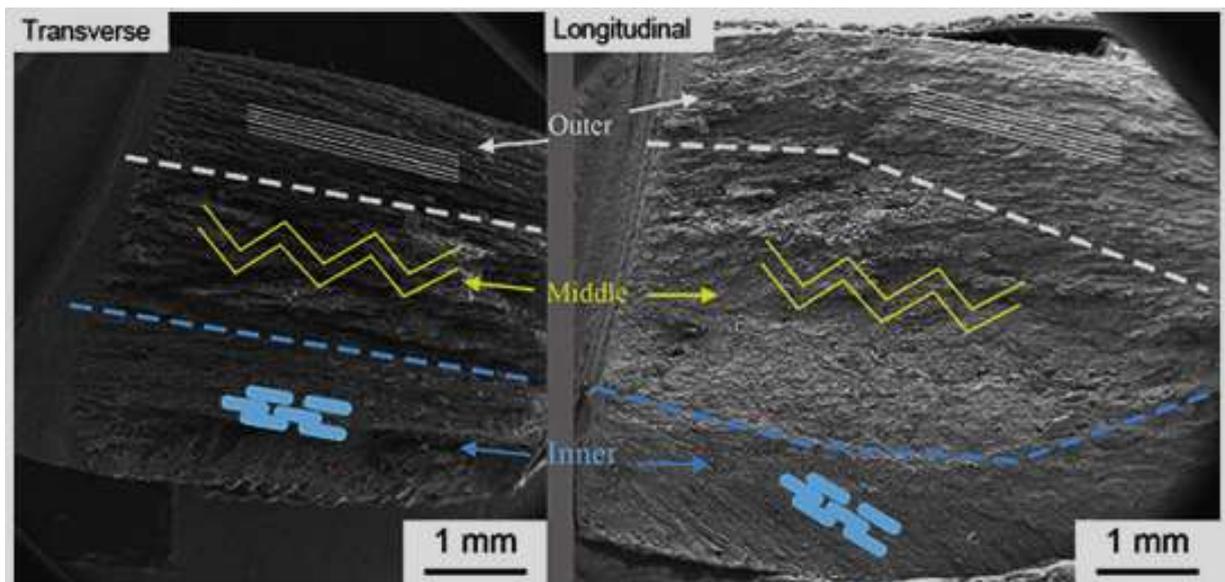


Figure 18 : Organisation spatiale de la corne coronale d'un pied de bovin. Faces obtenues après fracture provoquée. Microscope électronique. (25)

Cette organisation est particulièrement efficace pour **freiner la propagation en surface et en profondeur d'une fracture traumatique verticale de la corne** et pour **absorber et dissiper l'énergie des chocs répétés avec le sol** (26). Cette rigidité implique cependant des **capacités de récupération très faibles**, notamment lors de fractures de la corne. Cette architecture inspire aujourd'hui la synthèse de matériaux synthétiques (20).

Les tubules de la muraille dorsale sont orientés à 90° par rapport au plan du périople, ceux de la muraille abaxiale à 55° (21). **La rigidité de la muraille dorsale**, et donc sa résistance à la compression, est ainsi **supérieure à celle de la muraille abaxiale** (22). La **dureté** de la muraille est cependant **uniforme** sur toute sa surface.

La muraille qui est issue de la couronne a donc pour rôle essentiel de **supporter le poids du corps en dissipant l'énergie du choc avec le sol lors de la locomotion** (22).

4. La sole, le bulbe et les coussinets digitaux

La **sole au sens large** désigne la **partie inférieure de l'onglon** d'un bovin principalement en contact avec le sol (18) (10). Elle se compose en réalité de trois types de corne : la **sole** (*sensu stricto*) ou « **corne de la pince** » en français, et le **bulbe** ou « **corne de la sole et du talon** », séparés de l'extrémité distale de la muraille par la **ligne blanche**. En pratique, **rien ne distingue visuellement la corne de la sole (s.s.) de celle du bulbe**, qui sont différenciées par leur **consistance au toucher** : en traçant une ligne imaginaire reliant les extrémités de la ligne blanche, il est d'usage de définir **la sole (s.s.) comme la surface apicale « dure »** et le **bulbe comme la surface basale « molle »**. Anatomiquement parlant, la sole (s.s.) n'est qu'un étroit croissant sur la face solaire constituée à majorité par le bulbe (**Figure 19**).

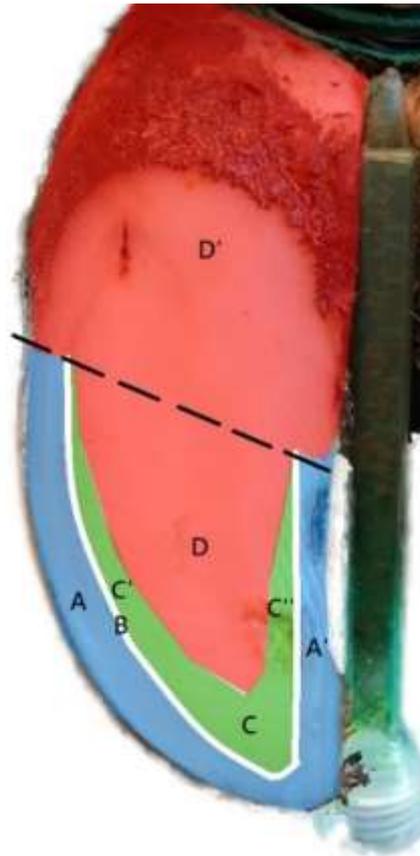


Figure 19 : Face solaire du pied, terminologies anatomiques d'après (3)
 (A) Muraille abaxiale (A') Muraille axiale (B) Ligne blanche (origine : paroi) (C) Sole corps apical (C')
 Sole branche abaxiale (C'') Sole branche axiale (D) Bulbe apical (D') Bulbe basal

Le pododerme de la sole (*s.l.*) se nomme **tissu velouté** (10). Dans la suite, le terme sole désigne la sole au sens large, sauf précision entre parenthèses.

a. La sole stricto sensu

La sole (s.s.) se distingue par le fait qu'elle **ne comporte pas de coussinet adipeux** hypodermique : le tissu velouté de la sole (s.s.) est lié au périoste de P3 par un **simple tissu conjonctif**.

L'épiderme de la sole est constitué de **papilles** orientées parallèlement à l'axe de la muraille (21) et disposées en lignes. Leur densité est relativement faible (16-20 par mm²) (11). La corne de la sole est une corne tubulaire **de dureté et de rigidité inférieure à celle de la couronne mais supérieure à celle du bulbe** ; son rôle dans la biomécanique du pied est négligeable.

b. Le bulbe

Le **bulbe** (ou *torus unguulae*) vient **compléter l'espace entre les branches du croissant formé par la sole** et s'étend jusqu'en **face palmaire** pour former la **corne du talon**. Ainsi, ce qui est appelé **sole (s.l.)** en pratique désigne majoritairement le **bulbe solaire**, sûrement pour le distinguer du bulbe, terme qui correspond à la zone anatomique du talon.

- **L'hypoderme du bulbe** est de loin **le plus développé du pied**. Il est composé d'un **coussinet plantaire ou digital du pied**, particulièrement épais, au niveau du talon (cet élément permet de le distinguer de la sole (s.s.))
- **Le derme du bulbe** recouvre le coussinet plantaire. Il est constitué de **papilles organisées en courbes sinusoïdales discontinues**.
- **La corne du bulbe** ne se distingue pas de la corne de la sole (s.s.) chez les bovins (contrairement au mouton ou à la chèvre où elle est proéminente). En région du talon, on en distingue souvent les **différentes couches successives**. La corne bulbaire située entre les branches de la sole forme une **surface légèrement inclinée vers l'axe du pied**, ce qui réduit la surface de contact au sol lorsque celui-ci est très dur (3) (22). La corne du talon remonte **jusqu'à la jonction avec la peau**.

L'épaisseur du bulbe au sein d'un onglon est inégale à cause de la forme légèrement concave de la face solaire de P3 : elle varie entre **3 mm** à l'apex de P3 à **7 mm** au plus profond de la concavité de P3 (24) (27).

La corne du bulbe est une corne **tubulaire peu dense en tubules** par rapport à la muraille (21). Les tubules sont constitués d'une médulla de **diamètre élevé** et sont également assez **désorganisés**. La résistance à la compression du bulbe est près de 4 fois inférieure à celle de la muraille (28). Sa **dureté** est deux fois plus faible que celle de la muraille dorsale, elle décroît depuis l'apex vers le talon (29). Ainsi, le bulbe est le segment **le plus élastique et le moins rigide** du pied (24) (22) (15). Ces caractéristiques lui permettent **d'épouser les irrégularités du sol** via la **surface solaire** lorsque le pied se pose. De plus, au niveau du **talon**, la corne du bulbe agit comme un **amortisseur élastique de la charge qui lui est imposée en atténuant l'impact**. En revanche, sa faible rigidité fait qu'elle protège moins les structures sensibles qu'elle recouvre (11).

La **corne du bulbe** formant le talon est arrondie mais **inégalement développée** entre deux onglons d'un membre postérieur (10) : le **bulbe de l'onglon médial** est **moins développé** dans sa moitié axiale, son bord d'appui axial est donc plus court et sa **surface d'appui est plus faible** que son homologue latéral. Cette différence n'existe pas pour les membres antérieurs.

Du fait de sa composition, **la sole peut s'user rapidement**, particulièrement sur les surfaces abrasives où l'épaisseur de la sole est très diminuée et peut amener à des **lésions apicales**, souvent confondus avec des lésions de la ligne blanche (12). Elles sont souvent chroniques et se compliquent en infection.

Par ailleurs, **l'épaisseur du tissu velouté (pododerme) de la sole n'est pas uniforme entre onglons** (27) (13). Elle est **plus élevée pour l'onglon latéral** (4,3 mm en moyenne) que l'onglon médial (3,9 mm) d'un postérieur. Cette différence s'observe extérieurement par un **volume plus élevé de l'onglon latéral par rapport à l'onglon médial d'un postérieur**, bien que l'épaisseur de corne solaire ne soit pas différente entre les 2 onglons (27). Elle s'explique par des **facteurs biomécaniques abordés dans la partie suivante**.

c. Les coussinets digitaux

Le **tissu hypodermique** des segments du **périople, de la couronne et du bulbe** est constitué essentiellement de **coussinets adipeux** entremêlés au réseau vasculaire (**Figure 20**) (3) (10). Leur rôle est de **protéger le tissu velouté** sous-jacent (30).

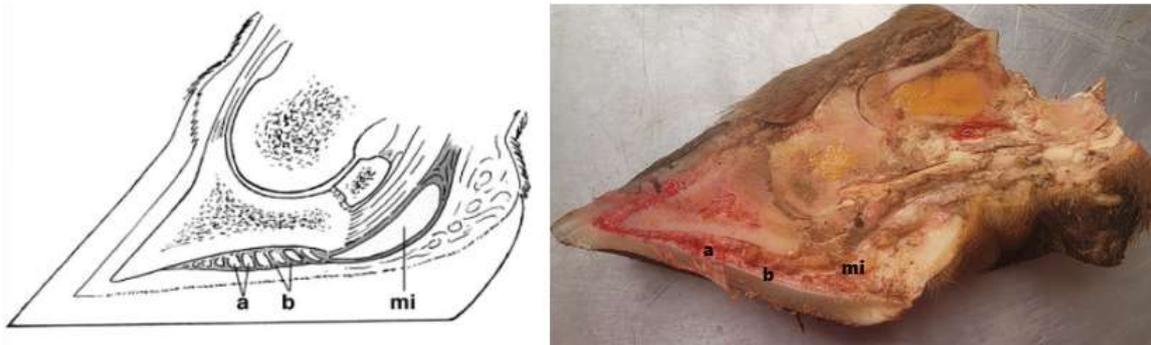


Figure 20 : Section sagittale d'un pied de bovin montrant les coussinets adipeux. Vue anatomique (à droite, source personnelle) et schématique (à gauche, (30))

(a) Coussinets axiaux/abaxiaux (b) Fibres de tissu conjonctif entre P3 et le derme stabilisant les coussinets (mi) Coussinet médian

Le coussinet digital du bulbe est le plus épais (31). Il prend la forme d'un V dont la pointe est dirigée vers l'apex du pied, **délimité** à son bord apical, axial et abaxial **par le derme de la sole** qui délimite le segment du bulbe (**Figure 21**) (30).

Le coussinet digital du bulbe est composé de **trois petits coussinets cylindriques** (axial, médian, abaxial) **longitudinaux et parallèles au tendon du perforant** en face palmaire du pied. Ces coussinets sont formés de **tissu adipeux** composé d'une quantité variable de **graisse liquide** encapsulée dans une enveloppe de tissu conjonctif riche en collagène reliée au pododerme qui la recouvre. Leur **teneur en lipides** est **plus faible que celles d'autres tissus adipeux** et principalement représentée par des **acides-gras mono-insaturés** (77 %) endogènes, contrairement au tissu adipeux péri-rénal composé d'acides gras saturés (32). Ces différences s'expliquent par les **rôles différents des deux tissus adipeux** : le coussinet digital n'a pas pour rôle d'être une réserve d'énergie, les acides gras mono-insaturés forment **un gras « doux » qui se déforme mieux** (32). Cette composition permet une **mobilité relative entre P3 et la boîte cornée** lors de la marche, en **atténuant les chocs** : la distance entre le périoste de P3 et la corne solaire varie avec l'enfoncement de P3 dans le coussinet adipeux, à l'inverse de la distance entre le périoste de P3 et la sole (s.s.) ou la muraille qui, en l'absence d'hypoderme adipeux, est invariable (33) (10).

L'extension des coussinets digitaux à la surface solaire de P3 varie (Figure 27) :

- Le **coussinet médian** se poursuit légèrement vers la face solaire jusqu'à **recouvrir un peu le *tuberculum flexorium*** du bord palmaire de P3 puis se confond avec le point d'insertion du perforant dans une capsule épaisse de tissu conjonctif
- **Les coussinets axial et abaxial se prolongent** eux au-delà sur la face solaire de P3 et échangent des branches transverses avec leur homologue respectif. **Le coussinet axial est le plus grand** et forme un petit bourrelet à son extrémité antérieure, se terminant 1-2 cm plus loin que le coussinet abaxial. **Il supporte l'essentiel du coté axial de P3 lors de l'application du poids** (34).

L'épaisseur du coussinet digital du bulbe apical est de 5 mm, contre 20 mm pour le bulbe basal constituant le talon (3). Ainsi, **la consistance de la corne du bulbe**, en apparence plutôt dure et rigide en face solaire et plutôt molle et élastique au niveau du talon, **n'est pas due à une différence de composition de cette corne** mais à **la présence des coussinets digitaux** dont l'épaisseur est 4 fois plus importante au niveau du talon (33). **Cette différence explique les différences de terminologie entre sole (s.l.) et sole (s.s.)** dans la pratique : **le bulbe en zone apicale**, dont le coussinet digital est de faible épaisseur, **est moins dépressible** au toucher que le reste du bulbe.

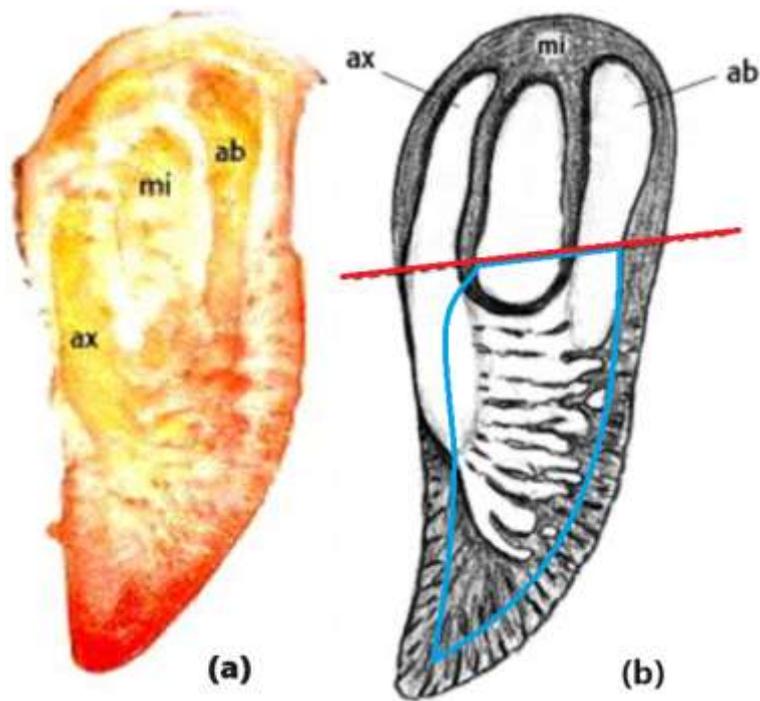


Figure 21 : Pododerme et hypoderme des segments de la sole et du bulbe après retrait de la boîte cornée et section parallèle à la surface solaire de P3. D'après (30) et (32).

Vue anatomique (a) et schématique où les coussinets sont en blanc (b). Les coussinets axiaux (ax), abaxiaux (ab) et médian (mi) sont visibles. La ligne bleue désigne les bords de P3 et la ligne rouge désigne son extrémité palmaire.

Il existe un **lien direct entre la couche réticulaire du pododerme du bulbe et le périoste solaire de P3** via un réseau de fibres de tissu conjonctif qui **divise les petits coussinets lipidiques en compartiments** (« comme les coutures d'un matelas » (30)).

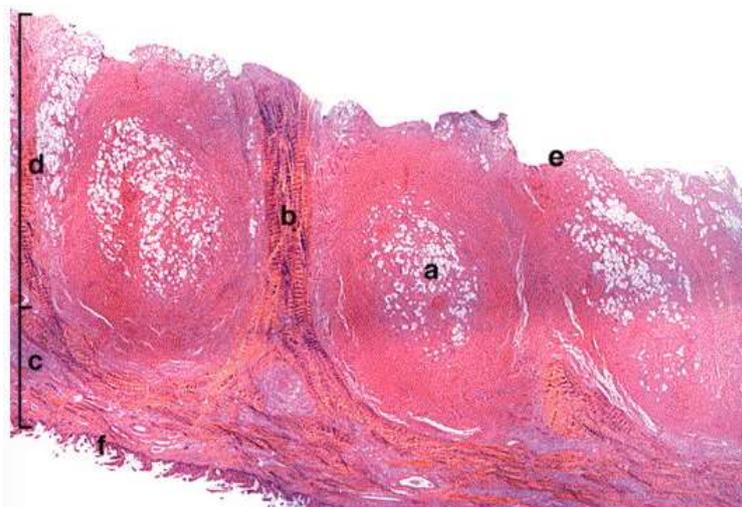


Figure 22 : Section longitudinale de l'extrémité apicale du coussinet adipeux abaxial montrant ses divisions. Onglon postérieur latéral. Coloration H&E. (30)

(a) Tissu gras « doux » (b) Fibres épaisses de tissu conjonctif (c) Pododerme (d) Hypoderme (e) Bordure du périoste de P3 (f) Papilles dermiques

Sous l'effet du **vieillessement**, de **l'augmentation du poids** de l'animal et/ou du **déplacement distal de P3**, le tissu adipeux des coussinets digitaux est **remplacé par du tissu conjonctif là où il est le plus sollicité** (30, 32). Ainsi, les coussinets axiaux des onglons postérieurs médiaux sont plus larges et à teneur plus élevée en lipides par rapport à leur homologue latéral, dont les lipides ont été remplacés par du tissu conjonctif. A l'inverse, **la teneur en lipides du coussinet abaxial en regard du *tuberculum flexorium* de P3 est la plus faible**, possiblement à cause d'une sollicitation majeure dans le support du poids du corps (cf *Partie 2.1, p.78*). Le processus métabolique impliqué reste à étudier.

Ainsi, **l'épaisseur et la structure du coussinet digital** lui permettrait de jouer un rôle optimal dans la **dissipation des charges à l'intérieur de la boîte cornée** et **l'atténuation de la compression du pododerme qui le recouvre** lors du choc de la phase d'appui de la marche, particulièrement au niveau du ***tuberculum flexorium***. Lorsque son épaisseur est diminuée, c'est un facteur prédictif solide du risque de boiteries (30) (31).

Hormis des facteurs liés à la biomécanique du pied, **deux facteurs principaux** exercent ensemble une **influence majeure sur la composition et l'apparence des coussinets digitaux : l'âge** (ou rang de lactation) **et la variation de l'état d'engraissement**. (31) Les **nullipares** ont un coussinet digital **épais mais peu riche en lipides** par rapport aux vaches (32) : il est plutôt composé d'un **tissu conjonctif lâche « caoutchouteux » peu lipidique**. La composition du coussinet digital **change beaucoup dès le 1er vêlage** pour **s'enrichir en tissu adipeux et en acides gras monoinsaturés** (33), supposément sous l'influence des nombreux changements hormonaux, alimentaire et comportementaux qui se produisent (30).

De plus, l'épaisseur des coussinets digitaux est positivement corrélée à la NEC de l'animal (12). Or, en **début de lactation**, la **NEC a tendance à diminuer** à cause de la mobilisation des acides gras vers la mamelle pour la production du lait, particulièrement chez les hautes productrices (35). Le coussinet adipeux digital est **mobilisé au même titre que les autres tissus adipeux**, sa teneur en lipides et son épaisseur diminuent (**Figure 23**) (31). Ainsi, de nombreuses études ont montré une **incidence des lésions de la sole bien plus élevée en début de lactation** (33) : ces lésions peuvent s'aggraver ou devenir chroniques si la diminution de NEC se poursuit (l'épaisseur du coussinet atteint un minimum à 4 mois après vêlage). Ainsi, les animaux avec une **diminution de NEC ou une NEC faible** ont **7 à 10 fois plus de chances de développer une boiterie pendant leur lactation** (36) (37).

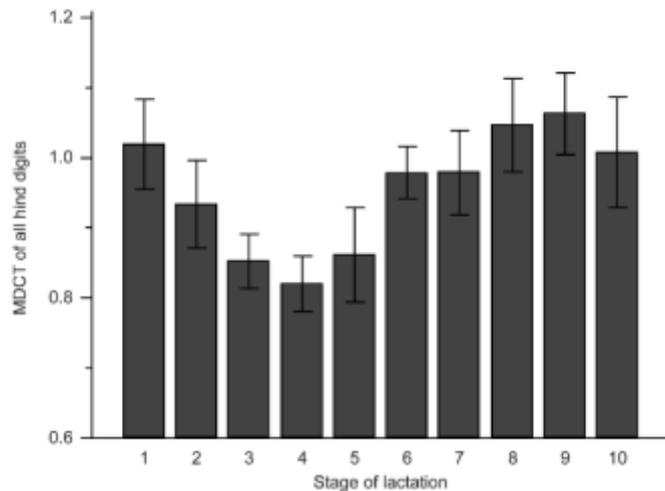


Figure 23 : Epaisseur moyenne ajustée du coussinet digital des quatre onglons des membres postérieurs selon le mois de lactation, corrélée positivement avec la variation de la Note d'Etat Corporel de l'animal (31)

Une autre différence entre génisses et vaches est la **concentration en acide arachidonique** (un précurseur de la prostaglandine et un médiateur de l'inflammation), **plus élevée dans les zones où les contraintes sont les plus importantes**. Or, elle est **plus faible chez les vaches que chez les génisses** : les coussinets digitaux joueraient le rôle de **capteur d'acide arachidonique** lorsque celui-ci est libéré lors de la compression solaire ou des lésions des tissus, permettant de **diminuer l'inflammation locale** (33). Au-delà de 3 lactations, la teneur en AG tend à diminuer et les lipides sont remplacés par du tissu conjonctif (30). Ce changement favorise **l'inflammation subclinique chronique du pododerme qui ne stocke plus l'acide arachidonique** (33).

5. La paroi

La paroi (ou segment lamellaire, le plus interne de la muraille) est **souvent confondue avec la muraille** elle-même à cause de la confusion des termes « wall » en anglais. Ce sont deux structures fondamentalement différentes par leur morphologie, la composition de la corne et sa fonction au sein du pied.

Aucune partie de la paroi n'est visible de l'extérieur sauf la ligne blanche en face solaire. La paroi fait suite au segment de corne de la couronne et se distingue, comme la sole (s.s.), par le fait qu'elle **ne comporte pas de coussinet adipeux hypodermique**.

- **Le derme de la paroi** se nomme **podophylle** (ou tissu podophylleux/feuilleté, chorion pariétal, *laminae*). Il prolonge distalement le derme coronal et **épouse le relief de P3**. **La couche germinative** de l'épiderme du podophylle est la **seule** du pied à **être lamellaire** : ces lamelles sont orientées proximo-distalement (**Figure 24**). A leur **extrémité proximale, distale et terminale**, ces lamelles sont **surmontées de petites**

papilles (proximales) ou de **longues et épaisses papilles** (distales et terminales) produisant des **tubules cornés**. A son extrémité distale, le **podophylle se réoriente** pour **suivre la surface solaire** et se prolonger par le derme papillaire solaire (38).

- Répondant aux lamelles de derme pariétal, l'**épiderme de la paroi** est constitué de **lamelles cornées constituant le kéraphylle** (« *stratum internum* ») et de **tubules cornés** là où il y a des papilles. Étant donné leur structure complémentaire, **podophylle et kéraphylle sont étroitement assemblés**.

La **corne pariétale lamellaire** est beaucoup plus souple et moins rigide que les **cornes tubulaires** (18). Son **renouvellement est plus rapide**, elle est ainsi moins « mature » et moins résistante à l'usure et aux forces qui lui sont appliquées.

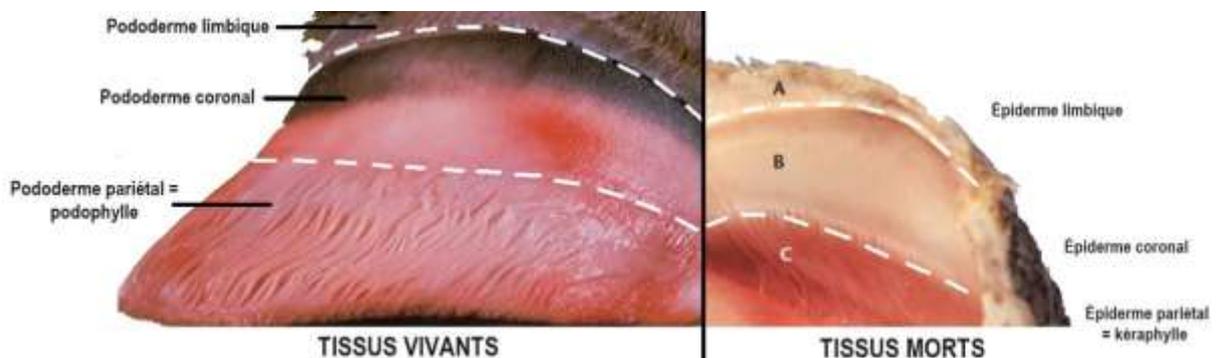


Figure 24 : Correspondance entre la couche superficielle vivante du pododerme (à gauche) et la face interne de la boîte cornée (à droite) en vue latérale après séparation entre corne et pododerme (d'après (23))

a. L'appareil suspenseur de P3 (laminar corium)

Le **derme pariétal profond** est constitué d'un système de **fibres de collagènes** qui s'insèrent sur la **face dorsale du périoste de P3** puis **cheminent obliquement** jusqu'à la **membrane basale et la couche germinative de l'épiderme** avec un angle par rapport à la surface de P3 qui varie selon la hauteur de la paroi : 75° dans sa partie proximale, 30-35° au milieu de la muraille et 90 à 110° en regard de la pointe de P3 (39). Ce collagène exerce une **tension** qui est transmise, *via* les **desmosomes et les faisceaux de filaments de kératine**, entre **kéraphylle, podophylle et périoste de P3** à la façon d'un « **scratch** », ce qui constitue une **attache solide peu mobile suspendant P3 dans la boîte cornée** (Figure 24 et Figure 25).

L'appareil suspenseur de P3 est le **garant de la stabilité mécanique du pied** : là où P3 repose sur le tissu velouté (particulièrement dans sa partie axiale), il est **suspendu au podophylle et à la paroi du pied** (10), particulièrement dans sa **partie abaxiale**. La vache ne se pose pas sur sa phalange mais celle-ci est suspendue à la paroi de l'onglon (18). **L'enfoncement caudal de P3 est limité par la tension du tendon du perforant** (40).

Les **propriétés mécaniques** du pododerme sont liées à trois de ses composants principaux. Le **collagène** est le constituant le plus abondant et détermine la force de tension que peut supporter le pododerme. **L'élastine et les protéoglycanes** ont un effet significatif à un faible niveau de déformation, en affectant la laxité du tissu et son comportement élastique (41).

La résistance de l'appareil suspenseur de P3 est telle que sa rupture mécanique nécessite une force **20 fois supérieure** à celle appliquée par le poids du corps lors de la marche (33) : il s'agit alors une fois sur deux d'un déchirement de la jonction podophylle-kéraphylle (14). Cette **résistance** ne diffère pas entre les membres antérieurs et postérieurs, ni même entre onglons médial et latéral mais elle est près de **deux fois supérieure dans sa partie abaxiale** (14), comparativement à sa partie axiale et dorsale. Cela s'explique par la **surface près de trois fois plus grande de podophylle en face abaxiale** qui restreint plus le mouvement du pied. Ainsi, cette asymétrie de résistance entraîne une **légère rotation physiologique de P3 vers l'axe du pied** lorsqu'il supporte le poids du corps. Cette rotation est souvent sans conséquence pour l'appareil suspenseur ou les coussinets adipeux de l'hypoderme (10) (34).

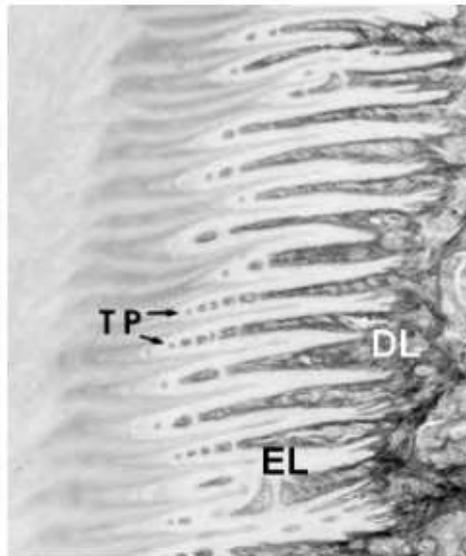


Figure 25 : Section transverse de l'extrémité distale de la paroi, microscope optique (38)
On observe l'imbrication entre les lamelles du podophylle (DL) et les lamelles cornées (EL) et le début de l'apparition des papilles terminales du derme pariétal (TP)

b. La ligne blanche

La ligne blanche (*zona alba*) constitue une zone particulière en face solaire : c'est la **jonction entre la corne de la muraille et celle de la sole** (3) (12) (42).

La corne de la ligne blanche est le résultat de la **synthèse de corne lamellaire et tubulaire de la paroi, continuellement poussée vers le sol** (38). Elle apparaît comme un **arc en croissant** qui s'étend **depuis le talon sur le bord abaxial de la sole, rejoint la pince puis revient sur environ 1/3 de la longueur du bord axial de l'onglon** (18) (Figure 10, Figure 19). Elle mesure 3,5 mm d'épaisseur au milieu de ses branches axiales et abaxiales et 6,5 mm à son extrémité abaxiale.

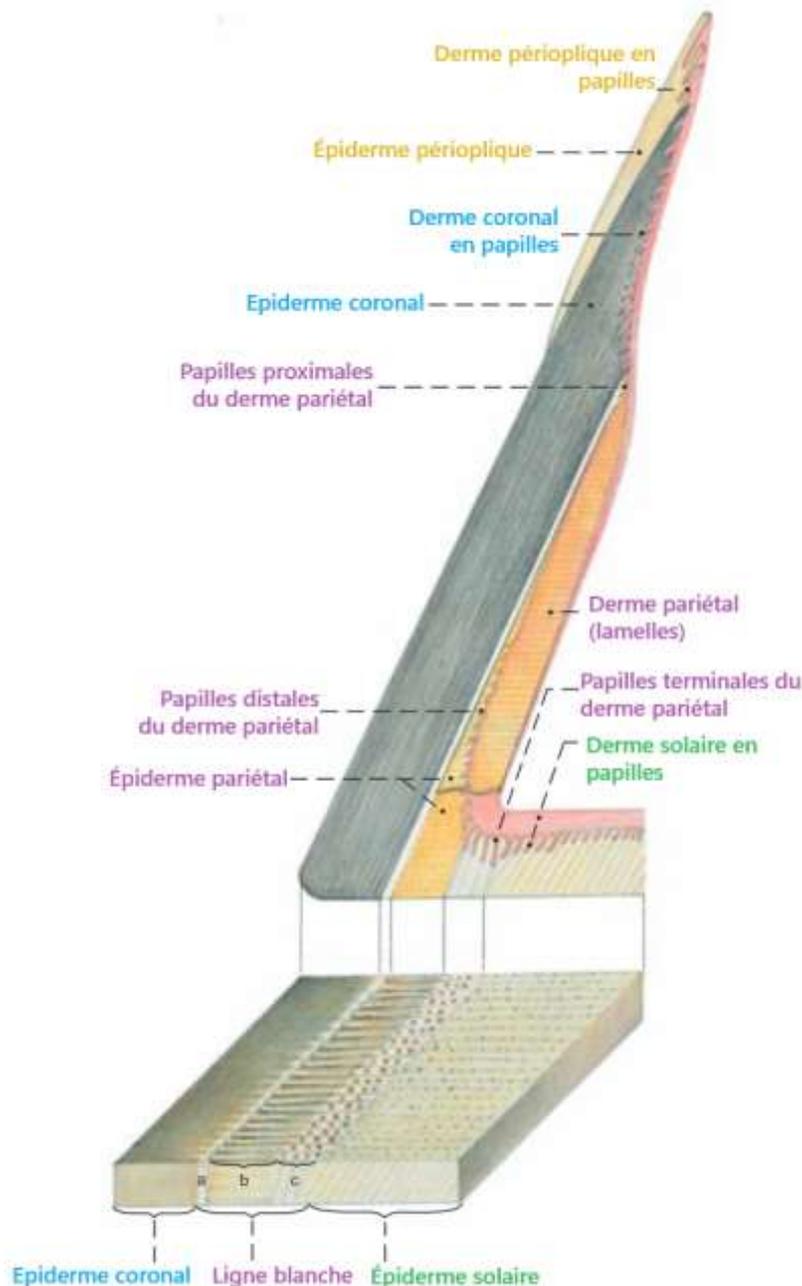


Figure 26 : Structure de la ligne blanche, vue sagittale (3)
(a) Zone externe (b) Zone intermédiaire (c) Zone interne

La ligne blanche est une corne dont **l'architecture est mixte** car synthétisée par différentes zones papillaires (38). La ligne blanche apparaît en face solaire sous la forme d'une **structure à trois zones** :

- **La zone externe** est produite par la **région la plus proximale** du derme pariétal qui suit le derme coronaire. Elle est composée de la **section basale de corne lamellaire non pigmentée** dans laquelle s'insère la corne tubulaire synthétisée par les papilles proximales, dont la pousse est dirigée vers le sol. Elle apparaît comme une **ligne décolorée étroite entre la corne coronaire et la zone intermédiaire**. Du fait de la longueur entre leur lieu de synthèse et le sol, cette zone est **plutôt rigide**.
- **La zone intermédiaire** est constituée de la section intermédiaire de la corne lamellaire et de corne tubulaire produite par les **papilles distales du derme pariétal**. Elle est plutôt **souple et friable**.
- **La zone interne** est constituée de tubules cornés épais mais **souples et friables**, produits par les **papilles terminales du derme pariétal** qui s'insèrent également entre les lamelles. Les tubules sont majoritaires par rapport aux lamelles, ce qui rend cette zone **moyennement rigide (Figure 26)**.

La kératogénèse est plus rapide pour les papilles terminales du fait de la faible longueur des tubules par rapport aux papilles proximales (38). De plus, **la liaison entre les cornes de ces trois zones** s'effectue seulement à **partir de l'étape de cornification** : les **adhésions cellulaires** sont donc **faibles**. Ces différences structurelles et synthétiques sont à l'origine de la **fragilité de la ligne blanche**. La corne de la ligne blanche est la **corne la plus molle** de la boîte cornée et joue le rôle de **charnière souple** entre la **corne dure de la muraille** et la **corne souple de la sole**. Les lignes blanches abaxiale et axiale se situent dans une région qui absorbe l'impact lors de la marche. Mais du fait de sa fragilité, elle n'est pas adaptée à supporter du poids, rôle de la muraille.

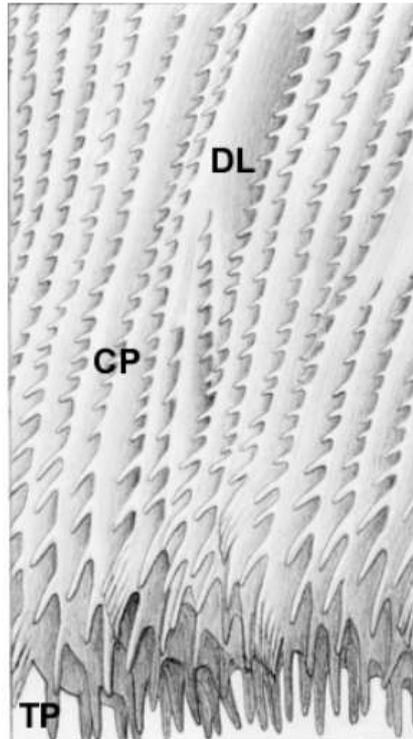


Figure 27 : Schéma de la surface du derme pariétal en région distale (38)
Les lamelles du derme (DL) sont orientées proximo-distalement et surmontées de papilles à leur extrémité libre (CP) qui, lorsque le derme devient parallèle au sol, s'allongent pour devenir des papilles terminales (TP).

6. Le système vasculaire et nerveux du pied

La vascularisation et l'innervation de la main ont une **importance limitée dans la biomécanique du pied** (43). L'**innervation** du pied présente un **cheminement similaire à celui des vaisseaux sanguins**, bien qu'il y ait de fréquentes et importantes variations individuelles. Elle est mixte, **motrice** en permettant les mouvements d'adduction et d'abduction, d'extension et de flexion, et **sensitive**. Pour un postérieur, l'innervation est assurée d'une part depuis le **nerf fibulaire** et le **nerf péronier superficiel**, d'autre part par le **nerf tibial**. On se limite ici à la **description du système vasculaire d'un pied postérieur**, d'organisation similaire à celui d'un antérieur (44) (45).

La vascularisation artérielle du pied (**Figure 28**) provient essentiellement de l'**artère tibiale craniale** prolongée par l'artère métatarsienne dorsale III **puis l'artère digitale commune dorsale III (Figure 28, 1)**. Le réseau palmaire, plus réduit, est constitué par les prolongements de l'**artère saphène** : l'**artère digitale commune plantaire III (Figure 28, 2)** et les **artères digitales propres plantaires abaxiales III et IV (Figure 28, 3)**. L'artère digitale commune plantaire III (**Figure 28, 2**) donne également un **rameau isolé vers le bulbe (Figure 28, 11)** avant de s'anastomoser dans le bulbe avec les rameaux des deux artères qu'elle produit (**Figure 28, 12 et 13**).

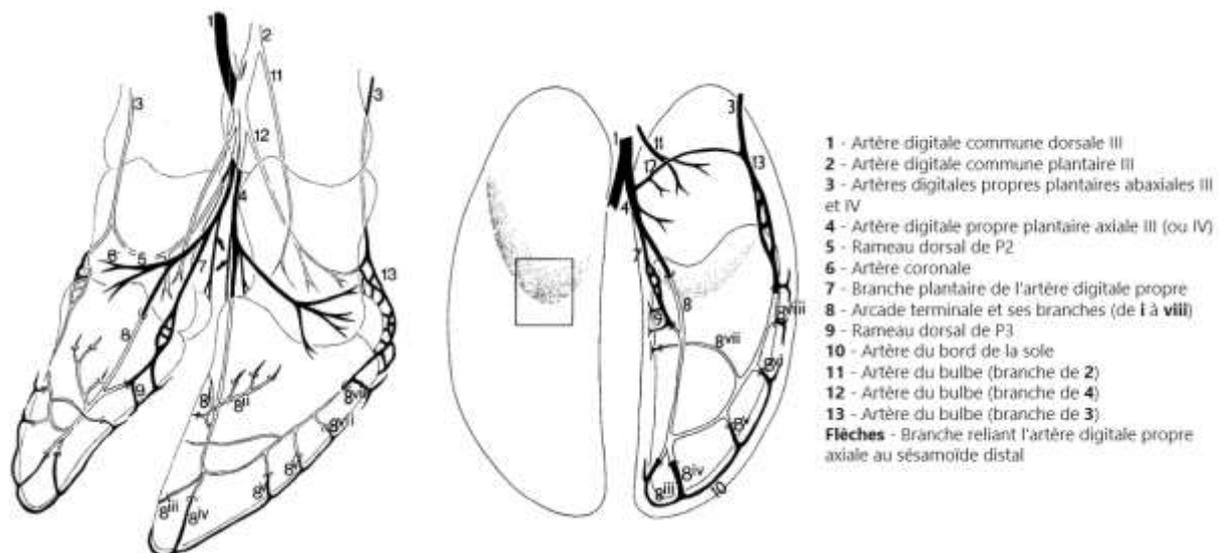


Figure 28 : Schéma du réseau artériel d'un pied de bovin. Vue cranio-axiale (gauche) et dorsale (droite) sur un pied postérieur (43)

L'artère digitale commune dorsale III (Figure 28, 1) donne deux artères digitales propres axiales III et IV (Figure 28, 4) qui cheminent dorsalement au niveau de l'espace interdigité. Chacune donne une **branche bulbaire** vers le bulbe puis, au niveau de la couronne, une **branche au sésamoïde distal** (Figure 28, flèches) correspondant ainsi qu'une **branche plantaire** (Figure 28, 7) à la paroi axillaire et à la sole puis s'engage dans l'onglon au niveau du bord dorsal axial de l'onglon. Au même niveau, le **rameau dorsal de P2** (Figure 28, 5) se ramifie pour donner l'**artère coronale** (Figure 28, 6) irrigant le derme et l'hypoderme coronal.

Chaque **artère digitale propre axiale** (Figure 28, 4) s'engage ensuite dans le foramen dorso-axial de P3 (proche du *processus extensorius*), passe dans le canal nutritif de P3 et devient l'**arcade terminale** (Figure 28, 8). Son trajet dorso-distal suit le bord axial de P3 puis abaxial en prenant une direction plantaire (10) puis elle émerge au niveau du foramen abaxial de P3 pour s'anastomoser caudalement avec les artérioles bulbaires (Figure 28, 11 et 12). Dans son trajet intra osseux, l'**arcade terminale donne plusieurs branches** (Figure 28, 8xx) qui émergent vers le **pododerme de la muraille, paroi (dont ligne blanche), sole et bulbe**, s'y ramifient et s'anastomosent. L'une de ces branches se dirige vers la face axiale de P3 et s'anastomose avec la branche plantaire (Figure 28, 7). Enfin, le **rameau dorsal de P3** (Figure 28, 9) irrigue le pododerme de la muraille axiale et de la sole.

Le réseau veineux du pied est extrêmement développé et ramifié en plexus (**Figure 29**). La **veine digitale propre dorsale** (**Figure 29, 2**) et les **veines digitales propres plantaires axiales et abaxiales** (**Figure 29, 3 et 4**) drainent l'essentiel du sang veineux de la boîte cornée, prolongées par la **veine digitale commune dorsale III** (**Figure 29, 1**) qui se poursuit par la **veine dorsale métatarsienne III** à mi-hauteur de P1. Ces veines résultent de l'anastomose de plexus veineux de la boîte cornée et de P3.

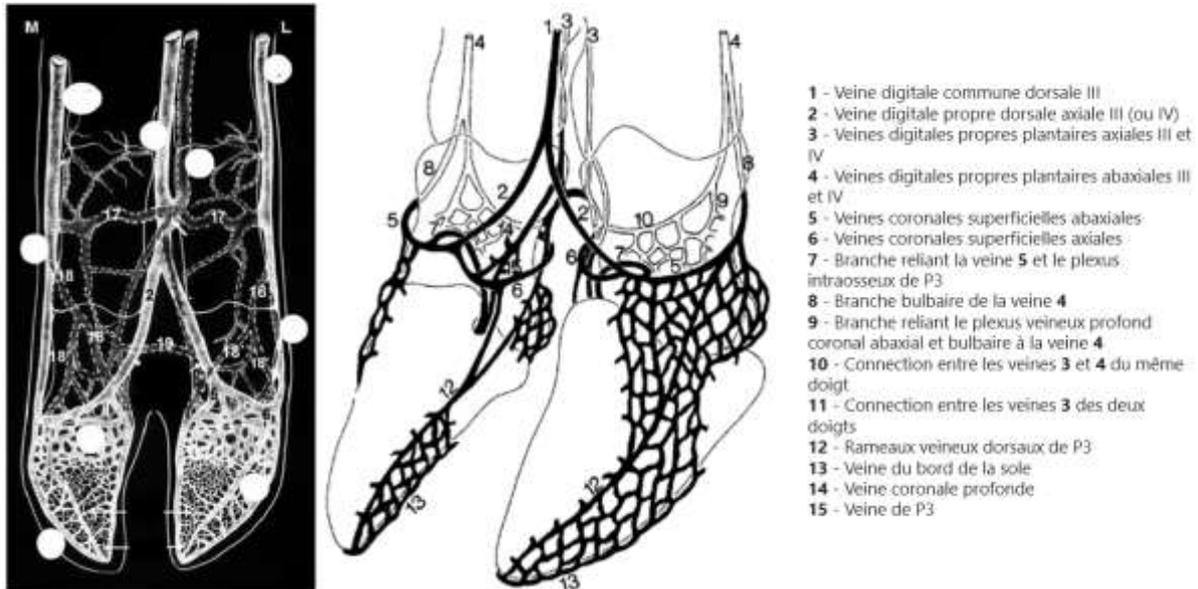


Figure 29 : Schéma du réseau veineux d'un pied de bovin, vue cranio-axiale d'un postérieur (à gauche) et image radiographique des vaisseaux du pied en vue dorso-plantaire (à droite) (43) (46)

On note le réseau très ramifié au niveau de P3. Ne pas tenir compte des nombres sur la radiographie.

Chaque veine digitale propre dorsale (**Figure 29, 2**) reçoit les **veines coronales superficielles axiales et abaxiales** (**Figure 29, 5 et 6**) qui suivent la surface axiale et abaxiale de la couronne vers la face plantaire du pied. Elles s'anastomosent avec les branches des **veines digitales propres plantaires axiales ou abaxiales** (**Figure 29, 3 ou 4**). La veine coronale superficielle axiale (**Figure 29, 5**) reçoit une branche provenant de l'hypoderme coronal (**Figure 29, 7**) qui suit l'artère digitale propre correspondante depuis le foramen axial et le canal nutritif de P3 où elle forme un plexus intra osseux développé.

La veine digitale propre plantaire abaxiale (**Figure 29, 4**) reçoit deux branches provenant du bulbe : la veine bulbaire (**Figure 29, 8**) la plus plantaire et les contributions des plexus veineux coronaux abaxiaux superficiels et profonds (**Figure 29, 9**).

Les veines digitales propres plantaires axiales et abaxiales d'un même doigt s'anastomosent *via* un vaisseau (**Figure 29, 10**) passant à travers le coussinet digital au niveau du talon. Les **veines digitales propres plantaires axiales** (**Figure 29, 3**) sont également **reliées** *via* un vaisseau (**Figure 29, 11**). Ces anastomosent forment un **véritable arc veineux distal au niveau du périople**. Le **rameau veineux dorsal de P3** (**Figure 29, 12**) rejoint le réseau veineux de la sole et la **veine du bord de la sole** (**Figure 29, 13**). Enfin, au bord axial de P3, une branche de la veine digitale propre plantaire axiale reçoit la veine coronale profonde (**Figure 29, 14**) et la veine de P3 (**Figure 29, 15**), qui drainent le coussinet coronal et le derme du bulbe et de la muraille axiale.

Le **réseau veineux** du pied s'abouche dans la **veine tibiale crâniale, la veine saphène latérale et saphène médiale**.

Au sein des papilles, la vascularisation prend la forme **d'une artériole et d'une veinule centrale** qui s'étendent sur toute la longueur de la papille, entourées d'un **fin maillage de capillaires et de veinules** interconnectés (18) (47). L'ensemble du derme du pied comporte de **nombreuses anastomoses artérioveineuses**, situées majoritairement **à la base des papilles ou lamelles** dermales. Le **podophylle pariétal** se distingue par deux caractéristiques : ses papilles terminales sont les seules où des anastomoses artérioveineuses connectent les deux vaisseaux centraux et forment des boucles en périphérie, et la moitié inférieure des lamelles comporte également beaucoup **d'anastomoses artérioveineuses**, des **élargissements focaux** et des **lits capillaires distendus**.

La vitesse de croissance et la qualité de la corne dépendent de l'apport sanguin en quantité et en qualité (18). Toute altération de la microcirculation au sein du pododerme, telle qu'une **vasodilatation des anastomoses à la base de plusieurs papilles/lamelles**, peut entraîner une **congestion** voire des **hémorragies focales** et ainsi affecter la production et la **qualité** (dureté, élasticité, résistance à la traction) de la corne produite et donc sa capacité **à résister aux agressions extérieures**. C'est en particulier le cas pour la **ligne blanche** du fait de la structure vasculaire particulière du derme qui en est à l'origine (48) (12) (47).

7. Les facteurs influençant la synthèse et la composition de la boîte cornée

La taille de la boîte cornée est normalement **constante au cours du temps** (11). La corne est en état de **turn-over permanent** : pour un onglon sain, la synthèse de nouvelles cellules cornées, qui **repoussent l'ensemble des cellules cornées qui les recouvrent** vers l'extérieur, est **compensée par l'usure** de cette surface, de telle sorte que la taille de l'onglon ne varie pas (11) (18). Ainsi, la corne de la **muraille** croît à un rythme de **4 à 7 mm par mois**,

celle de la **sole de 3 à 4 mm par mois** (49), il doit en être de même pour leur vitesse d'usure. La croissance est aussi plus rapide pour la muraille abaxiale qu'axiale, pour les onglons latéraux des postérieurs par rapport aux médiaux et pour les onglons postérieurs par rapport aux antérieurs. Ces valeurs dépendent de la race.

Dans des conditions normales d'usure (onglon à plat sur un sol dur, avec du mouvement), les **longueurs de muraille et de talon sont normales** : l'onglon est ferme et droit sur le sol, l'angle entre sole et muraille est maintenu, l'appui est alors **stable** (10).

Plusieurs facteurs externes influencent la boîte cornée et sa synthèse.

a. L'âge de l'animal

Chez le **jeune**, les **rythmes de croissance sont plus élevés**, ils ralentissent à partir de la 1^{ère} lactation (11) (18). L'angle dorsal tend à diminuer, la longueur de la bordure dorsale, la surface de la sole et la hauteur du talon tendent à augmenter avec l'âge ; de façon plus générale, **la taille de l'onglon augmente avec le poids de l'animal**. La vitesse de kératinisation se stabilise à 6 ans environ où elle reste constante pour le reste de la vie de l'animal.

b. L'alimentation

La qualité et les propriétés de la corne sont dépendantes d'un **apport sanguin de qualité** au corium pour un bon déroulement de la kératogénèse (18) (50) (11). La plupart des lésions de la corne sont associées avec une qualité de corne médiocre, bien souvent à cause d'une mauvaise alimentation (19).

Les apports en acides-aminés (notamment sulfurés tels que la cystéine (19)), les **minéraux** (Ca, Cu, Zn, Se, Mn) et les **vitamines** (A, D, E) sont essentiels pour produire la kératine (17). De même, les apports en **acides-gras essentiels** sont indispensables pour produire la substance intercellulaire. Par exemple, une complémentation en **biotine** (vit. H), une vitamine qui agit en tant que cofacteur d'enzymes de la kératinisation et dans la synthèse d'acide gras, en cure de 10 mois ou plus, a permis **d'augmenter la dureté de la corne, de réduire son humidité, d'augmenter la teneur en lipides** de la corne de la sole (19) (51). L'hypocalcémie favorise le cerclage de la muraille par défaut de Ca dans la kératinisation (19).

Ces apports en suffisance permettent une **croissance rapide de la corne chez le jeune** (près de 2,5 fois plus rapide que chez l'adulte) (18). A l'inverse, **la croissance de la corne est réduite lors du dernier tiers de gestation**. Elle est également réduite chez les espèces hautes productrices de lait où les besoins énergétiques de l'animal sont rarement remplis: ce ralentissement s'observe par la formation de sillons semicirculaires sur la boîte cornée (11). Ces apports déterminent également la forme et solidité de la corne (11) (52).

c. L'humidité et les effluents d'élevage

L'humidité de l'environnement influence fortement les propriétés de la boîte cornée. Comme elle contient peu d'eau par rapport à la peau normale (25-30 % (25) (26)), **elle l'absorbe très rapidement** principalement *via* la corne intertubulaire (50), plus vite qu'elle ne la perd (30 % de saturation en 1 heure seulement (50)). **La substance intercellulaire agit comme rempart aux variations trop fortes d'humidité** (19).

Ainsi, une **corne soumise à l'humidité** est **plus molle et plus flexible** et est associée à des **lésions podales plus sévères**, tandis qu'une **corne sèche** est **moins résistante à l'installation et la propagation de fractures** (25) (11). La dureté et l'effet abrasif du sol jouent également un rôle respectivement négatif et positif sur la dureté (11). L'eau est suspectée de provoquer des micro-fractures dans la kératine et la substance intermédiaire (21).

L'exposition prolongée à l'urine ou les fèces peut détruire les cellules cornées et leur ciment (c'est en particulier visible dans l'érosion des talons). L'utilisation de pédiluves de formaldéhyde et l'activité bactérienne diminuent la dureté de la corne (18) (50) (11).

d. Les lésions podales

Les lésions podales entraînent des altérations physiques de la boîte cornée. L'inflammation du podophylle perturbe la synthèse ou les liaisons des filaments de kératine et donc diminue la solidité mécanique de la corne (17) : la muraille est moins résistante aux coups et les cailloux déforment plus facilement le bulbe ou la sole. La croissance de la corne est accélérée lors de fourbure ou après un parage (11).

e. Autres facteurs

Les **hormones** semblent également jouer un rôle important dans le rythme de la kératinisation (17) : **l'insuline** (dont le taux diminue en début de lactation, ce qui peut compromettre la production de corne par manque de glucose et d'acides-aminés), les glucocorticoïdes, des facteurs de croissance locaux (11)...

Les saisons semblent également influencer la kératogénèse (11). La croissance de la corne est un processus cyclique qui suit la photopériode : elle est plus rapide l'été et moins rapide l'hiver. Ce processus serait lié à la température, qui lorsqu'elle est trop basse, provoquerait la vasoconstriction des artérioles sanguines et donc la diminution des apports au pododerme... Les changements de conduite d'élevage et de nature du sol (ration, pâturage) participent également à ces changements.

PARTIE 2

LA BIOMECHANIQUE DU PIED : CINETIQUE, CINEMATIQUE, LESIONS, PARAGE PREVENTIF ET CONCEPTION D'UN MODELE PEDAGOGIQUE

La biomécanique est « l'étude de l'application des lois de la mécanique aux phénomènes vitaux » (53). C'est une discipline qui allie les principes de la mécanique à l'étude des organismes vivants, dans le but de comprendre les mouvements, les forces et l'implication des structures anatomiques dans la modification des états d'équilibre d'un système biologique, ici le pied du bovin.

La mécanique se divise en deux branches, **la statique et la dynamique** (54). La statique s'intéresse aux corps en équilibre, analysant les forces agissant sur un objet immobile alors que **la dynamique s'intéresse aux objets en mouvement**, en considérant les forces qui les influencent et en examinant les changements dans leur vitesse et leur trajectoire. Dans la dynamique se distinguent **la cinétique et la cinématique**. **La cinématique** se focalise sur la description des **mouvements** en termes **de trajectoire, de vitesse, d'accélération, et de temps**, sans tenir compte des forces responsables de ces mouvements. A l'inverse, la **cinétique** introduit une **notion de masse** et se concentre sur **l'analyse des forces qui provoquent les mouvements** en considérant les interactions entre les objets et les causes de ces changements dans le mouvement. On dit souvent que **la cinématique répond à la question « Comment ? »**, tandis que **la cinétique répond à la question « Pourquoi ? »**.

Ainsi, l'étude de la biomécanique du pied est principalement une **étude dynamique cinématique et cinétique**. Elle s'intéresse au mouvement du pied et cherche à **caractériser les différentes phases de la marche physiologique d'un bovin, les forces qui s'appliquent sur les pieds et leurs conséquences**. Dans cette partie, le référentiel d'étude par défaut est celui **d'un élevage en bâtiment sur sol bétonné dur**, on considère comme objet de base le pied représenté par son centre d'inertie (ou centre de pression) et on applique évidemment au pied le principe de conservation de la masse.

Dans cette partie, on décrit dans un premier temps **la cinématique de la marche** en décrivant et décomposant le pas et la foulée d'un bovin. On détaille ensuite **la cinétique de la marche** par un inventaire des forces qui s'appliquent sur le pied et leur application **lors de la marche** et **lors du cas particulier de la station debout**. On évoque également les **conséquences de la cinétique sur la boîte cornée** et **les lésions mécaniques qu'elle génère** ainsi que les causes de la perte d'intégrité de l'appareil suspenseur de P3. Dans un second temps, on décrit les **conséquences d'une boiterie sur la biomécanique du pied** avant d'introduire **le parage préventif** dont on explique **l'intérêt** à travers **l'effet de l'élevage en bâtiment sur la boîte cornée** puis **les objectifs, la technique** et **les effets biomécaniques du parage**. Enfin, on termine par la **description de l'élaboration du modèle de pied de bovin destiné à l'enseignement, ses objectifs, ses possibilités et sa conception**, ainsi que quelques pistes d'améliorations avant de **conclure** ce travail.

I. Etude cinématique de la démarche du bovin

1. La foulée d'un bovin : caractérisations des phases

Une foulée est la **coordination répétée des membres**, leur schéma de placement et le cycle complet de mouvement d'un animal (2). Il n'y a pas de convention sur le départ d'une foulée mais **sa fin correspond à l'instant où le pied est revenu dans sa position de départ**.

Plusieurs techniques permettent de décomposer la foulée d'un bovin. Parmi elles, des études récentes ont établi le **pédogramme d'un bovin** (55) : à partir des mesures d'accélération en magnitude d'un vecteur de déplacement dont la variation est observée au cours du temps, on caractérise les grandeurs liées aux étapes de la foulée et leur correspondance visuelle (**Figure 30**). Ainsi, on divise la foulée d'un membre en **deux grandes phases : la phase d'appui et la phase de mobilisation** (29).



Figure 30 : Phases de la foulée de l'antérieur gauche d'un bovin (source vidéo : TheSilentWatcher, Youtube)

La phase d'appui (29) débute lorsque le pied touche le sol et se termine lorsque le pied se soulève complètement du sol. Pendant la phase d'appui, les forces de déplacement du pied s'exercent sur le sol (qui en exerce en retour) de telle sorte que l'on peut diviser la phase d'appui en cinq phases :

- **Phase 1 « Foot load »** (posé du pied ou amortissement) : elle débute lorsque le pied se pose sur le sol et commence à supporter le poids du corps
- **Phase 2 « Maximum braking »** (freinage maximum) : elle débute lorsque le pied subit la **décélération maximale**
- **Phase 3 « Midstance »** (intermédiaire ou soutènement) : elle débute lorsque le pied arrête de freiner et commence sa propulsion ; c'est également la **position par défaut** lorsque le bovin est **immobile debout, le membre vertical**
- **Phase 4 « Maximum propulsion »** (propulsion maximale) : de façon analogue à la **phase 2**, elle débute lorsque le pied exerce une **force d'accélération maximale** pour propulser le corps en avant
- **Phase 5 « Push off »** (décollage ou propulsion) : elle débute lorsque le pied est **presque entièrement décollé du sol** jusqu'à ce qu'il le soit

La phase de mobilisation (56) correspond à l'avancée du membre, entre l'instant où le pied quitte le sol et l'instant où le pied est posé. Elle se décompose en trois phases :

- **Phase 6 « Acceleration/Initial swing » (ramener, rétraction)** : elle débute lorsque le membre quitte le sol après la propulsion
- **Phase 7 « Midswing » (suspension)** : temps intermédiaire pendant lequel **le pied passe à l'avant de son homologue controlatéral**
- **Phase 8 « Deceleration/Terminal swing » (l'embrassée, protraction)** : elle termine l'avancée du membre **jusqu'au contact avec le sol**

Ces phases permettent de définir des **valeurs cinématiques spatiales et temporelles physiologiques** de la foulée d'un bovin, présentées dans le **Tableau 1**. On note de nombreuses différences entre les membres antérieurs et postérieurs, **particulièrement dans les durées des phases**. De plus, lorsqu'un postérieur termine sa phase de soutien, l'antérieur du même côté **a déjà commencé sa phase de soutien** (sinon le bovin n'aurait aucun appui ipsilatéral) (57). Les membres contralatéraux font de même mais de façon décalée dans le temps. Ainsi **pendant la durée de la foulée, deux ou trois pieds sont en phase d'appui** : ces situations sont nommées **double et triple support**. Pendant le temps de **double support**, l'appui est alterné entre appui **ipsilatéral et diagonal (Figure 31)**.

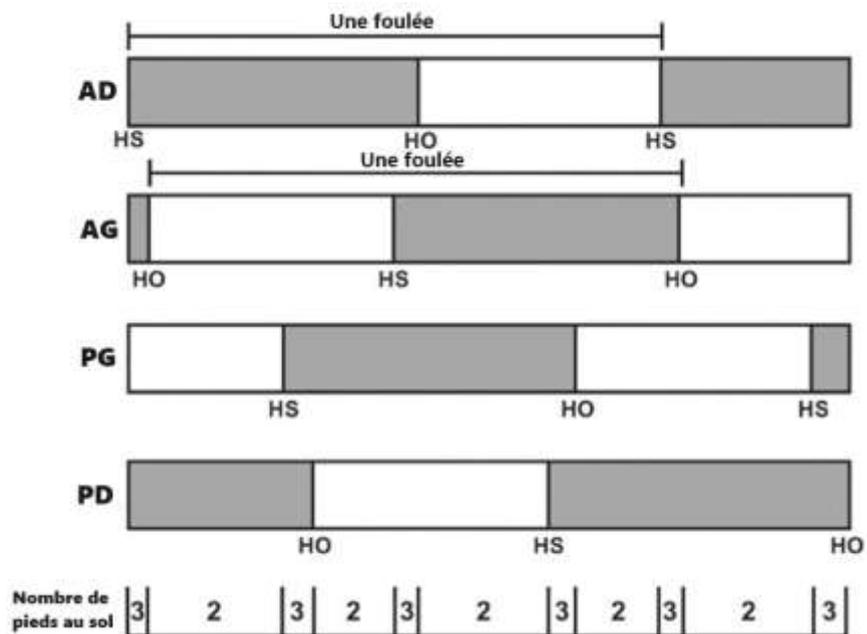


Figure 31 : Proportions de double et triple support pendant la foulée pour chaque membre (56)

(HS) Début de phase 1 (HO) Fin de phase 5 (Gris) Phase d'appui (Blanc) Phase de mobilisation

Variable	Description	Valeurs pour un antérieur	Valeurs pour un postérieur
Variables spatiales			
Longueur d'un pas	Distance horizontale entre 2 appuis consécutifs du même pied	135-140 cm	
Largeur du pas	Distance verticale entre deux appuis consécutifs de deux pieds controlatéraux	10 cm	15 cm
Hauteur maximale du pied	Distance entre le pied et le sol pendant la phase de mobilisation	9,6 cm	
Angle de protraction	Angle vertical maximal formé dans le plan médian lors de la phase 1	25°	24°
Angle de rétraction	Angle vertical maximal formé dans le plan médian lors de la phase 5	-46°	-30°
Variables temporelles			
Vitesse moyenne	Longueur d'un pas / longueur d'un pas	0,9-1,3 m/s	
Durée d'une foulée	Intervalle entre 2 appuis consécutifs du même pied sur le sol	1,3s	
Durée d'appui	Durée pendant laquelle le pied est en contact avec le sol	65-68 %	64 %
Durée de mobilisation	Durée pendant laquelle le pied n'est pas en contact avec le sol	35 %	36 %
Temps de double support	Durée pendant laquelle deux pieds sont posés en même temps	10 % du temps d'appui pour chaque pied 11 % appui diagonal – 80 % appui ipsilatéral	
Temps de triple support	Durée pendant laquelle trois pieds sont posés en même temps	17 % du temps d'appui pour chaque pied 14 % appui d'un seul antérieur – 18 % appui d'un seul postérieur	

Tableau 1 : Valeurs cinétiques spatiales et temporelles physiologiques de la foulée d'un bovin (55, 56, 58–62)

2. La phase d'appui : cinématique linéaire et angulaire, biomécanique de la boîte cornée

La **cinématique linéaire** (spatiale) décrit les mouvements en termes de **position, de trajectoire, de distance** et de déplacement dans l'espace en fonction du temps ; la **cinématique angulaire** s'intéressant aux **mouvements angulaires et de rotation** (54).

Juste avant la **phase 1**, l'extension des doigts entraîne une **légère rotation externe** du pied (l'axe interdigité axial est orienté vers l'extérieur), via les tendons extenseurs des doigts du fait de leur disposition dorso-latérale et de la forme de l'extrémité distale du radius (63) (58). A cet instant, l'apex des doigts pointe légèrement dorsalement et l'espace interdigité et les soles cranio-latéralement : ainsi, **le talon de l'onglon latéral est la partie du pied la plus proche du sol (Figure 32)**. L'espace interdigité s'élargit légèrement.



Figure 32 : Photographie de la position d'un pied postérieur gauche juste avant le début de la phase d'appui (58)

Au début de la phase 1, le pied entre **en contact avec le sol** : l'appui se fait en 1^{er} par le talon et le bord abaxial de l'onglon latéral, puis se prolonge vers l'apex et le bord axial de l'onglon latéral. Cet appui est **exagéré pour un postérieur** où il se fait **quasi-exclusivement sur le talon de l'onglon latéral**. Sous l'effet de l'appui de l'onglon latéral, l'onglon médial toujours suspendu subit un bref mouvement involontaire avant de se poser, moment pendant lequel l'onglon latéral glisse de quelques millimètres.

Au début de la phase 2, l'appui se prolonge vers le talon de l'onglon médial et l'articulation du pied atteint sa flexion maximale (environ 160°) (59) (60). **Au début de la phase 3**, l'appui se prolonge vers l'apex de l'onglon médial. L'espace interdigital s'élargit passivement et « pousse » médialement l'onglon médial ; sa largeur reste ensuite constante pendant toute la phase d'appui.

Pendant les phases 1 et 2, des mouvements d'oscillations de l'onglon et des tissus mous se propagent le long et perpendiculairement au membre. Les tissus proximaux au bourrelet coronaire sont comprimés.

A la phase 3, le membre est perpendiculaire au sol et les deux onglons supportent visuellement le poids du corps.

De la phase 1 à la phase 3, le pied opère donc un mouvement de bascule caudo-latéral vers cranio-médial et l'axe longitudinal de l'os canon passe d'une position légèrement latérale à une position légèrement médiale (Figure 33).

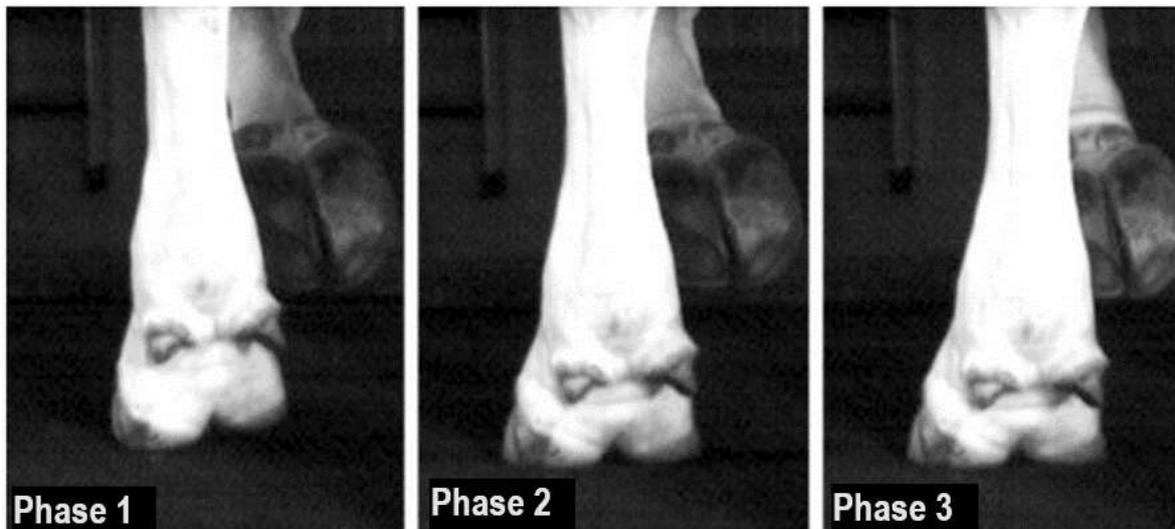


Figure 33 : Décomposition photographique des trois premières phases de l'appui montrant la bascule latéro-médiale du pied (58)

L'axe longitudinal de l'os canon, légèrement latéral à la phase 1, est vertical à la phase 2 et légèrement médial à la phase 3.

Lors de la phase 1, la valeur absolue de l'angle du membre antérieur par rapport à la verticale est moins élevée pour un antérieur (31°) que pour un postérieur (38°), l'inverse se produit à la phase 5 (respectivement 23° et 12°) ; il en ressort que **l'amplitude d'angle entre antérieur et postérieur est quasiment identique** (environ 50° , Figure 34) (64) (61).

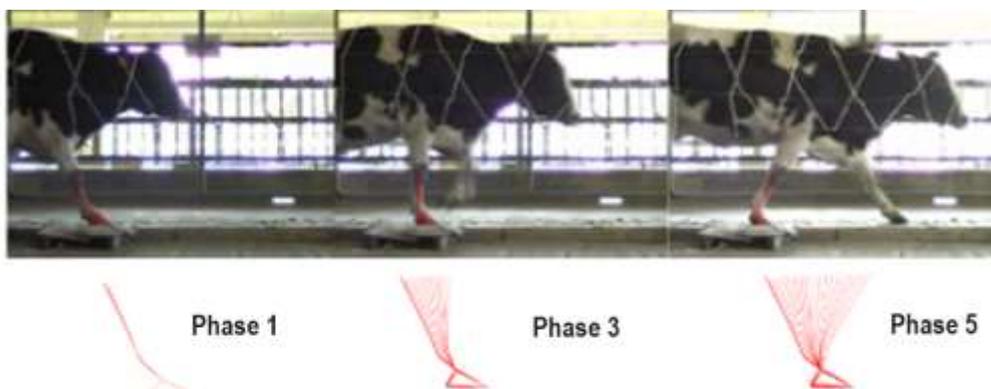


Figure 34 : Cinématique angulaire d'un membre antérieur pendant la phase d'appui (60)

A la phase 5, l'axe de l'espace interdigité du pied s'oriente légèrement vers l'intérieur (pour un antérieur) ou l'extérieur (pour un postérieur), ce qui augmente (respectivement diminue) la largeur initiale du pas.

Ainsi, la phase d'appui d'un pied mobilise davantage le talon de l'onglon latéral. Cette situation est moins marquée pour un bovin jeune dont les deux onglons sont moins gros et de taille équivalente, mais l'appui mobilise quand même d'avantage l'onglon latéral du fait de la démarche décrite ci-dessus et de l'asymétrie de longueur entre doigt latéral et doigt médial (5). De plus, pour un bovin adulte, l'écart de temps d'appui entre l'onglon latéral puis celui de l'onglon médial est doublé pour les membres postérieurs : l'onglon latéral d'un postérieur est donc sur-mobilisé par rapport à son homologue antérieur.

3. La phase de mobilisation : cinématique linéaire et angulaire et biomécanique du membre

La trajectoire spatiale verticale d'un pied postérieur pendant la phase de mobilisation (Figure 35) est parabolique avec un maximum atteint à la phase 7 (56). La trajectoire spatiale d'un antérieur atteint un maximum au début et à la fin de la phase de mobilisation. Bien qu'aucune explication n'ait été avancée pour l'expliquer, cette différence est probablement à attribuer aux différences anatomiques entre les membres.

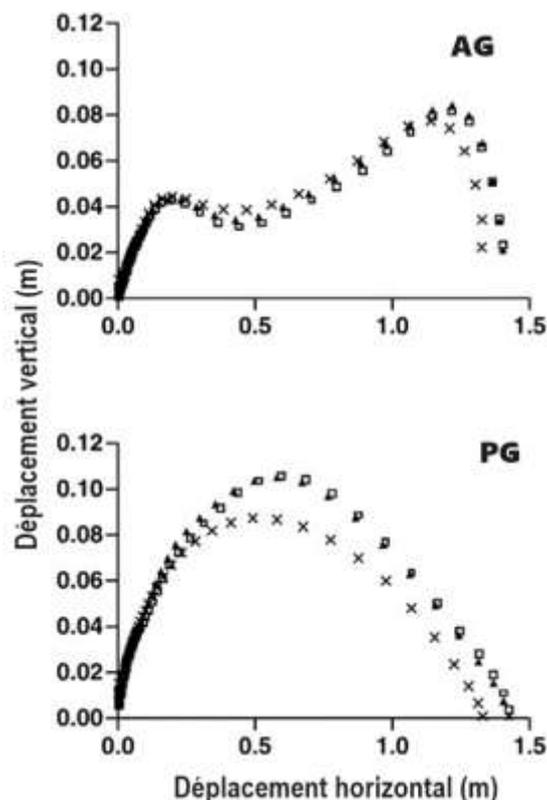


Figure 35 : Trajectoires spatiales d'un pied pendant la phase de mobilisation (56)
(Carré) Pieds sains (Triangle) Lésion de la sole (Croix) Ulcère de la sole

Dans sa **trajectoire horizontale** lors de la protraction, le pied antérieur se place dans le plan sagittal des épaules, tandis que le pied postérieur subit une **légère rotation interne** et se place **proche du plan médial devant le membre controlatéral** (en touchant presque le boulet du pied controlatéral) (58). L'espace interdigité du postérieur est alors fermé. Le membre postérieur dessine ainsi une **trajectoire horizontale sinusoïdale autour du membre controlatéral** (**Figure 36**). Cette trajectoire est altérée pour les VLHP dont la mamelle gêne ce mouvement normal, bien qu'aucune association entre taille de mamelle et prévalence de lésions podales n'ait été établie à notre connaissance.

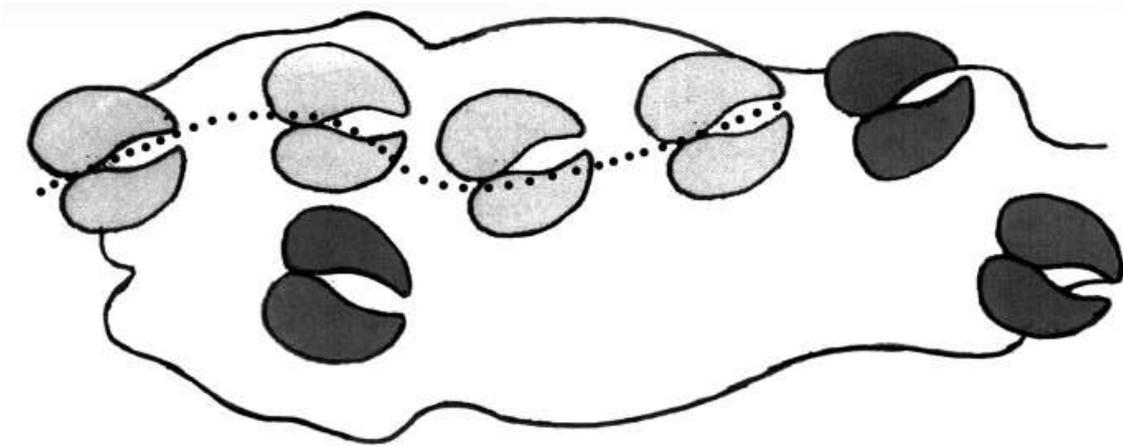


Figure 36 : Représentation schématique d'un bovin montrant la trajectoire horizontale sigmoïde du postérieur gauche vue du dessus (58)

L'amplitude d'angle d'un membre antérieur est plus élevée (80° contre 60°) que celle d'un postérieur (**Figure 37**) (62) : selon les auteurs, la cause est la différence de conformation anatomique du membre en amont du pied. La flexion de l'articulation du carpe à **la phase 5** est responsable de la durée plus élevée de la phase d'appui d'un pied antérieur (**Tableau 1**) et a pour conséquence directe un angle de protraction plus élevé et atteint plus vite lors de la **phase 6**. **L'amplitude d'angle plus élevée d'un antérieur est donc « compensée » par une protraction plus rapide au détriment d'une phase d'appui plus longue**. En revanche, elle permet d'avoir une **durée relative de phase de mobilisation** quasiment **identique entre antérieur et postérieur**.

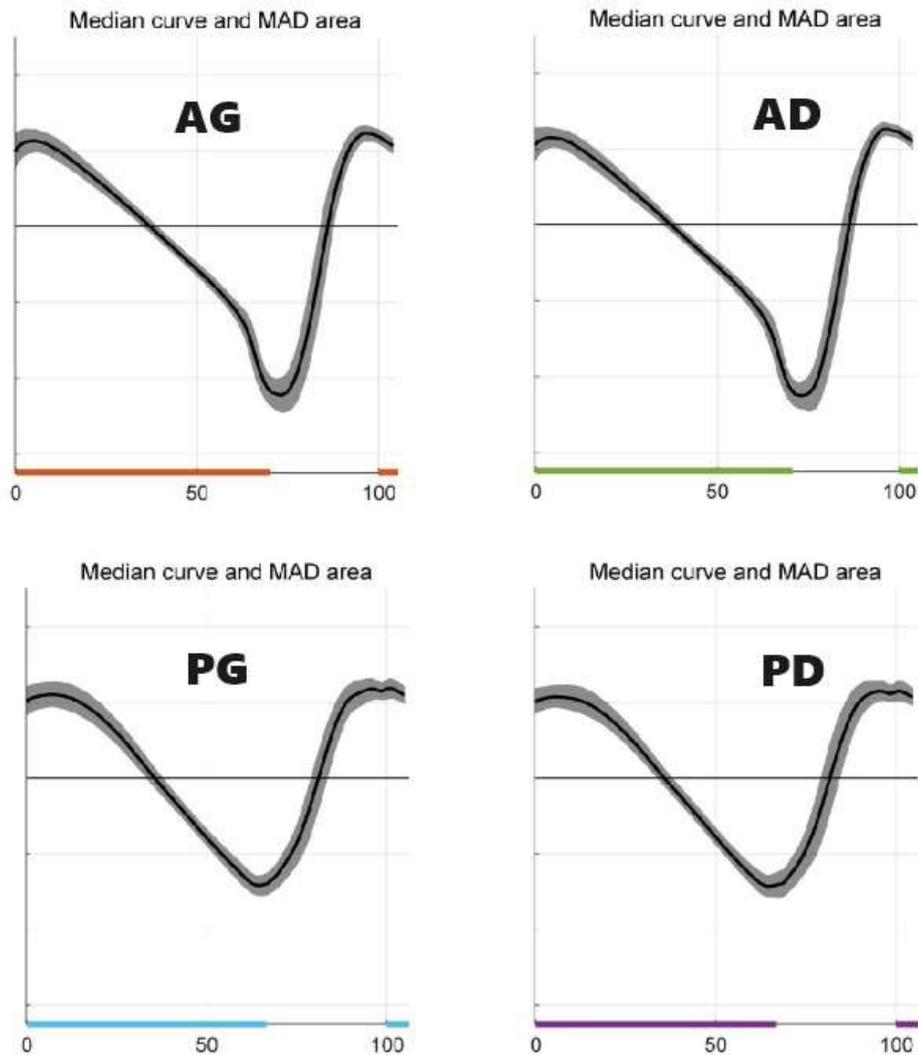


Figure 37 : Evolution de l'angle du pied sur une échelle de zéro à 100 % de la durée totale d'une foulée (62)

La phase de soutien de chaque pied est indiquée par une ligne de couleur sous la courbe. Courbe correspondant à la moyenne des mesures relevées (« median curve »), aire grisée autour de la courbe correspondant à l'écart médian absolu (« MAD area »).

Une vidéo de la démarche d'un bovin sur tapis de course et résumant les éléments décrits ci-dessus est disponible sur internet (65). La surface d'appui dépend également de la race et est corrélée positivement avec le poids et la taille des animaux (66).

4. Intérêts de l'étude cinématique de la démarche d'un bovin : applications dans les élevages

Les éléments de cinématiques présentés ci-dessus sont essentiels dans le cadre de cette thèse mais ils présentent également à eux seuls un intérêt direct en pratique pour la détection des boiteries au sein des élevages.

En effet, plusieurs variables comportementales sont corrélées à une boiterie (57) : la durée d'activité ou de marche, le nombre de pas, le ratio d'activité jour/nuit, le nombre de fois où l'animal se lève ou change de position. D'autres facteurs semblent également indicateurs de boiteries, tels qu'un changement d'habitus de l'animal, qui reste plus longtemps couché, prend moins de temps pour se nourrir et se nourrit moins sur la journée... Cependant, il n'y a pas de preuves suffisantes ou ces variables sont trop aléatoires pour être considérées comme des mesures fiables et surtout **spécifiques de boiteries**. A l'inverse, les variables liées à **la démarche** sont **plus spécifiques** d'une boiterie : la vitesse de marche, la distance de pas, le report du poids lors de la station debout et des mesures très sensibles telles que le **placement du pied et la durée de la phase de mobilisation**. Il existe moins d'études à leur sujet mais elles ont une **valeur prédictive positive très élevée**, particulièrement lorsqu'elles impliquent l'utilisation d'un ou deux accéléromètres placés sur les 2 membres antérieurs ou postérieurs (55) (67). D'autres éléments reliés au pied sont utilisés pour analyser la démarche d'un bovin : le **déplacement vertical sinusoïdal du sacrum**, du **garrot** (68) (69), de **l'os coxal** (os iliaque), le **déplacement irrégulier de la tête et de l'encolure** (62). La **courbature du dos** est également un facteur indicatif positif des boiteries, particulièrement lorsque la variation est mesurée à un niveau individuel (valeur prédictive positive de 91 %) plutôt que collectif.

Ainsi, l'analyse de la démarche mais aussi du comportement de l'animal ouvre de nombreuses possibilités de **détection de boiteries automatisées** par l'utilisation de tapis renfermant des capteurs de pression (68), **l'utilisation de caméras** pour filmer les déplacements ou le **port d'accéléromètres** par l'animal : ces derniers se présentent sous la forme de dispositifs similaires aux colliers analysant l'activité des animaux pour la détection des chaleurs (70), ils sont pour l'instant coûteux mais plus précis que les tapis de pression et surtout bien plus précis que la détection manuelle par l'éleveur via une grille de score qui reste très subjective (71) (72). Ces technologies sont facilement déployables dans des bâtiments de configurations différentes et sont prometteuses pour l'avenir, en permettant de détecter et de traiter précocement les boiteries, évitant leur aggravation et augmentant la production et le bien-être de l'animal (57).

II. Etude cinétique de la démarche du bovin

L'étude cinétique vise à **expliquer les éléments de cinématiques** abordés dans la partie précédente en expliquant **leurs causes** (certaines ont déjà été citées : **l'attachement des tendons extenseurs du doigt, la flexion du carpe en fin de phase 5...**) et **leurs conséquences** sur la boîte cornée et les tissus qu'elle protège. Cette étude débute par **l'inventaire des forces** pouvant s'appliquer sur le pied lors du mouvement puis **la façon dont elles s'appliquent** lors de **la marche** et dans le cas particulier de **la station debout**. Elle se poursuit par la description du **schéma pathogénique à l'origine des lésions mécaniques du pied les plus fréquentes** et les conséquences des boiteries qu'elles engendrent. Enfin, elle se termine en décrivant les **étiologies de la perte d'intégrité de l'appareil suspenseur de P3 et ses conséquences**. Pour rappel, on considère par défaut que le bovin évolue sur un sol bétonné de stabulation.

1. Inventaire des forces s'appliquant sur le pied

La description des forces s'exerçant sur le pied à un moment donné permet de connaître son mouvement (54) : la somme vectorielle de leur composante donne pour résultat une force nette qui, lorsqu'elle n'est pas nulle (pied immobile), caractérise l'amplitude et la direction du mouvement et donc son accélération et sa vitesse.

a. Les forces externes : les forces de réaction au sol et les frottements

Les forces externes passives sont liées à la transmission du poids du corps via l'axe osseux du membre (54) (29). Lorsqu'un bovin est debout ou se déplace, **la force du poids du corps** exercée depuis le pied vers le sol génère des forces de même amplitude mais de sens opposé du sol sur le pied (d'après la 3^{ème} loi du mouvement de Newton (54)). Ces forces, appelée « **force de réaction du sol** » (FRS), sont présentes durant toute la phase d'appui et représentent les forces externes les plus significatives. Bien qu'elles soient distribuées sur la surface du pied qui est en contact avec le sol, on considère souvent qu'elles s'appliquent en un point particulier que l'on nomme **centre de pression** (CDP) et qui constitue l'origine du vecteur qui les représente. Ce vecteur est constitué de trois composantes (73) (74) :

- **La composante verticale** qui supporte le poids du corps. **Elle tend vers zéro** lorsque le pied est levé ou que le pied contro-latéral supporte le poids du corps et **elle peut dépasser le poids vif** lors des phases de freinage ou de propulsion
- **La composante horizontale** (ou antéro-postérieure) qui constitue une **force de friction** qui empêche le bovin de glisser vers l'avant ou l'arrière. Elle permet également la **propulsion** vers l'avant ou le **freinage** en arrière, donc l'accélération ou la décélération. Elle existe sous deux formes : le frottement statique, qui s'oppose à

l'initiation du mouvement (non pertinent dans cette étude cinétique), et le **frottement cinétique** qui s'oppose à un mouvement en cours (75) (54)

- **La composante latérale** (ou médio-latérale), qui est négligeable vu la cinématique du mouvement et la faible amplitude des mouvements d'abduction/adduction des membres du bovin (8)

Ainsi, les forces de réaction au sol du pied permettent de déterminer **le mouvement global du bovin** et de **différencier la démarche physiologique d'une démarche pathologique**.

Le ratio entre les composantes horizontales et verticales de la FRS, juste avant que les objets commencent à glisser l'un par rapport à l'autre, détermine le **coefficient de friction statique** (CFS) ; ce même ratio mesuré pendant que les objets glissent à une vitesse donnée détermine le **coefficient de friction dynamique** (CFD) (54, 75). Ils sont à comparer avec le **coefficient de friction limite** (CFL) qui détermine l'**amplitude de friction minimale** pour que le bovin **puisse marcher normalement et sans retenue**. Le **CFL doit donc rester inférieur au CFS** pour éviter que l'animal ne glisse : ce dernier adapte son allure pour maintenir cette condition. Dans le cas contraire, **l'animal glisse tant que le CFL est supérieur au CFD** (alors constant). L'amplitude du CFD dépend du sol, de la corne et des fluides entre ces surfaces (eau, fèces...).

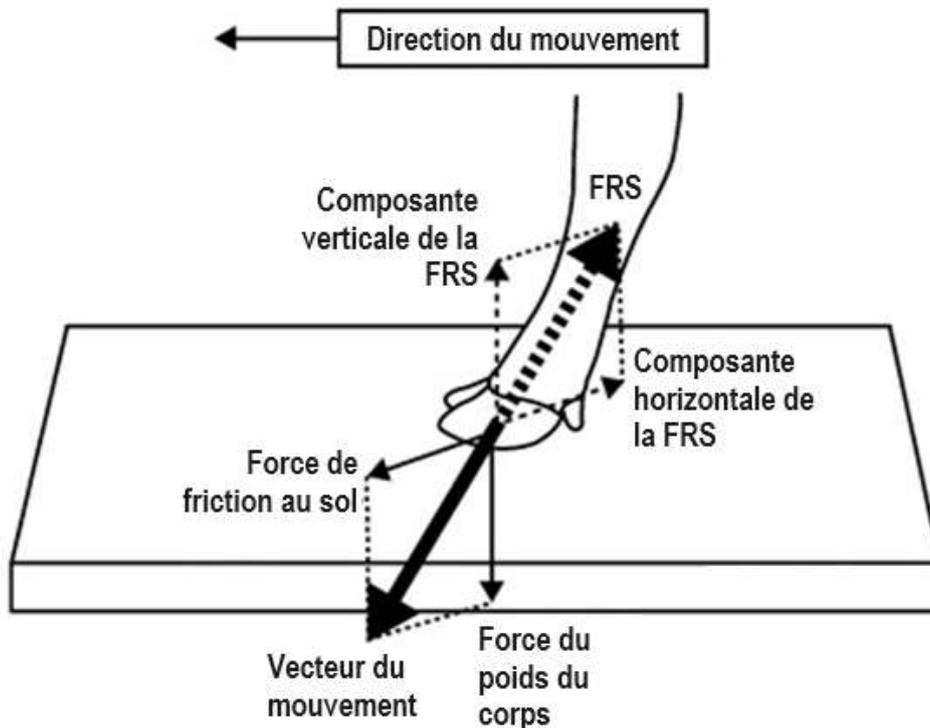


Figure 38 : Diagramme de corps libre du pied (adapté depuis (75))

b. Les forces actives : forces musculaires et tendineuses

La locomotion du bovin fait appel à la **contraction de nombreux muscles** qui permettent le mouvement des articulations (76). Dans le contexte de la locomotion, les muscles permettent **de fléchir (contracter) et d'étendre (relâcher) les articulations**, et la coordination précise entre muscles antagonistes est nécessaire pour permettre une flexion et une extension harmonieuse des articulations et du membre. En outre, les forces musculaires et tendineuses sont cruciales dans le maintien de la stabilité du pied et du membre pendant la locomotion : plus l'animal est debout longtemps, plus l'activité des muscles augmente.

Dans le pied, **aucun muscle charnu n'est présent** : seuls les tendons transmettent les forces musculaires aux parties mobiles du pied. Ces forces s'appliquent pendant toute la foulée mais sont particulièrement importantes dans le mouvement du pied lors de la phase de mobilisation. Peu d'études mesurent les contributions relatives de chaque muscle à la locomotion : dans la suite de l'étude cinétique qui se concentre sur le pied, les contributions des muscles dans le mouvement sont décrites de façon succincte en s'appuyant essentiellement sur des sources anatomiques.

2. Etude cinétique de la démarche physiologique du bovin

L'évolution de la force de réaction au sol ainsi que la distribution des pressions sous le pied pendant la phase d'appui sont présentées dans la **Figure 39** et la **Figure 40**.

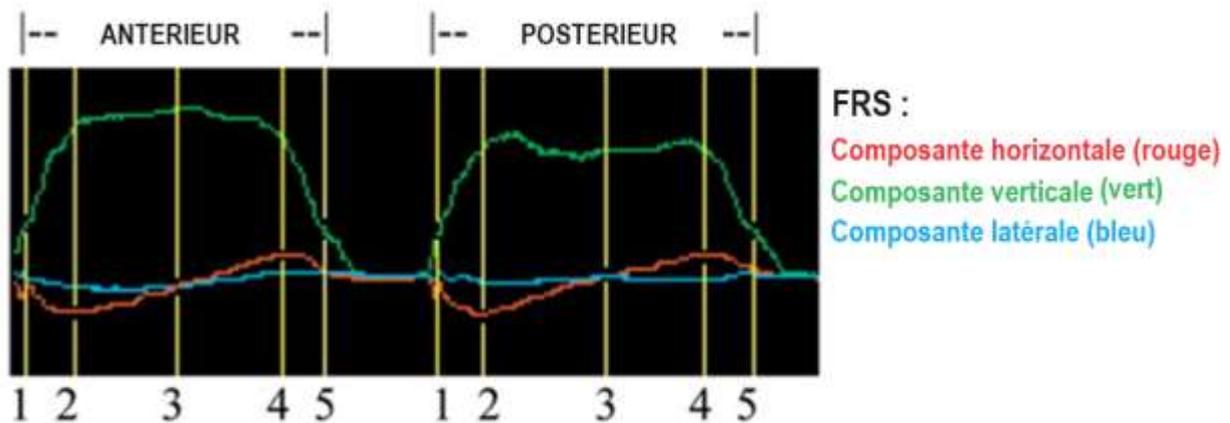


Figure 39 : Evolution de la force de réaction au sol d'un antérieur et d'un postérieur gauche au cours des cinq phases de la phase d'appui (29)

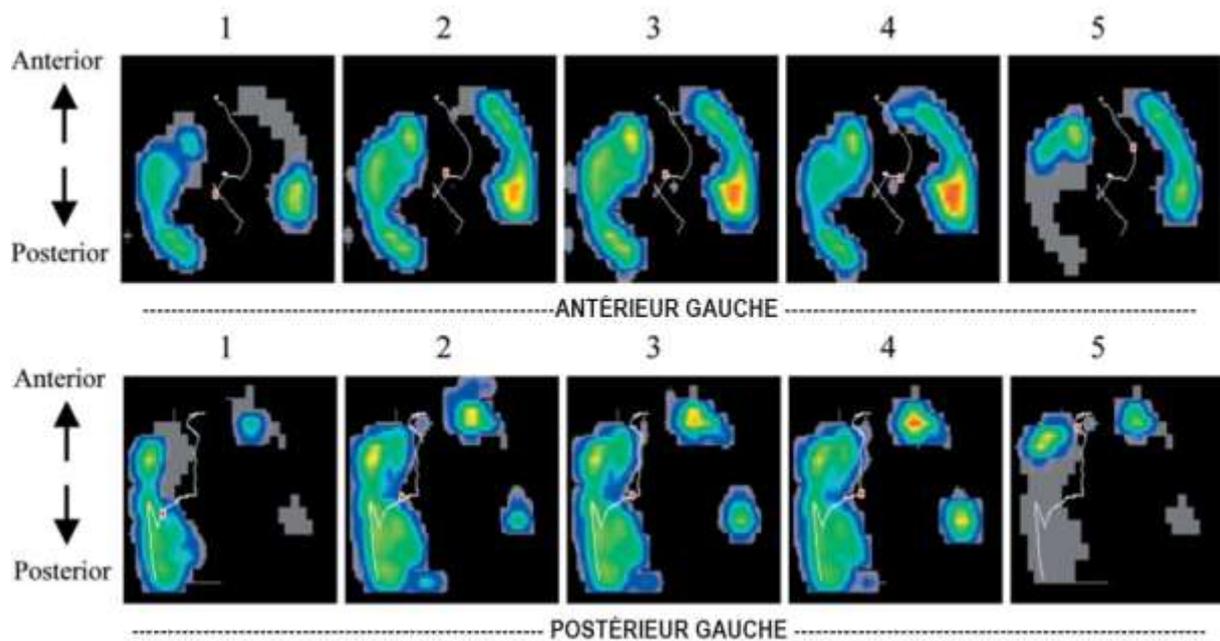


Figure 40 : Evolution de la distribution des pressions sur la face solaire du pied au cours des cinq phases de phase d'appui (29)

Le point rouge indique le Centre de Pression (CDP), la ligne blanche indique la trajectoire du CDP au cours de la phase d'appui. Les couleurs correspondent à la valeur de la pression mesurée par unité de surface (N/m^2). De la plus basse à la plus élevée : bleu < bleu clair < vert < jaune < rouge.

a. Phase 1 : le posé du pied

Au cours de la phase 1, la composante verticale de la FRS atteint 30 % de sa valeur maximale et augmente jusqu'à la phase 3 (29). La composante horizontale est négative et diminue jusqu'à la phase 2 : elle représente le **freinage progressif du pied**, une **force de décélération dirigée vers l'arrière**.

L'amplitude de la FRS est également répartie sur les deux onglons antérieurs et le reste **jusqu'à la fin de la phase d'appui**. A la phase 1, elle s'exerce sur le bulbe de l'onglon latéral et plus faiblement sur celui de l'onglon médial. A l'inverse pour un postérieur, la FRS s'exerce à **95 % sur la moitié latérale de l'onglon latéral** ; durant cette phase, il supporte jusqu'à **1/6 du PV de l'animal**. La FRS s'égalise progressivement dans les phases suivantes.

La surface de contact du pied avec le sol augmente depuis la phase 1 (23cm^2) jusqu'à la phase 3. La pression moyenne sur un antérieur (50N/cm^2) est inférieure à celle d'un postérieur (60N/cm^2), probablement car sa surface de contact est plus élevée (29). Ces pressions moyennes restent stables **jusqu'à la phase 5**. A l'inverse, les **pressions maximales** sont plus élevées pour un antérieur (107N/cm^2) par rapport à un postérieur (88N/cm^2).

Le CFL maximal est de 0,83, bien supérieur à la valeur du CFS de l'interface béton-pied (75).

La charge progressive du pied provoque la **flexion progressive des articulations interphalangiennes proximale (IPP) et distale (IPD)** (de façon plus marquée sur l'onglon latéral) et par conséquent **l'abaissement de l'articulation métacarpo-phalangienne** qui se retrouve en **hyperextension** (8) (77). Cette flexion est limitée par la tension des tendons des muscles extenseurs des doigts et par le ligament suspenseur du boulet qui assure le soutènement passif de l'angle métacarpo-phalangien.

b. Phase 2 : le freinage maximal

Au cours de cette phase, la composante horizontale de la FRS atteint sa valeur **minimum**, signifiant une **décélération maximale** (29).

Pour un **antérieur**, l'amplitude de la FRS s'exerce (*pour rappel équitablement sur les 2 onglons*) au niveau du **bulbe** et de la **muraille** et peu au niveau de la sole. Pour un **postérieur**, l'amplitude de la FRS (*pour rappel qui se répartit progressivement vers l'onglon médial*) reste largement concentrée sur la **sole et le bulbe de l'onglon latéral**.

La surface de contact du pied avec le sol augmente. Les **pressions maximales** augmentent et restent plus élevées sur un antérieur (130N/cm² antérieur) par rapport à un postérieur (105N/cm²) : elles restent **stables jusqu'à la phase 5**.

Le CFL maximal diminue à 0,4 et reste **stable jusqu'à la fin de la phase d'appui** : il est légèrement supérieur à la valeur du CFS de l'interface béton-pied (75).

c. Phase 3 : le soutènement

Durant cette phase, la composante verticale de la FRS atteint son maximum puis **diminue jusqu'à la fin de la phase d'appui** (29). Elle est plus élevée pour un antérieur que pour un postérieur (51 % vs 37 % du poids vif). La composante horizontale de la FRS est nulle puis augmente jusqu'à la phase 4.

La surface de contact d'un pied **atteint son maximum** (50 cm²) et **diminue jusqu'à la fin de la phase d'appui**. (29) Elle est plus élevée pour un antérieur.

La tension sur l'appareil suspenseur provoque son **extension de 2 mm** (78).

d. Phase 4 : la propulsion maximale

La composante horizontale de la FRS atteint sa valeur positive maximale (29) : elle représente une force **propulsive dirigée vers l'avant**, signifiant une accélération maximale. L'action du muscle fléchisseur profond des doigts contribue significativement à la propulsion.

e. Phase 5 : le décollage

La composante verticale de la FRS est réduite à 30 % de sa valeur maximale (29).

L'amplitude de la FRS est exercée à peu près équitablement entre les deux onglons pour antérieur et postérieur, au niveau de la **muraille dorsale** et de la **partie antérieure de la sole**.

La surface de contact d'un pied diminue à 15cm². Les **pressions moyennes**, jusqu'ici stables, **augmentent fortement** jusqu'à 80-85 N/cm² pour les deux membres. Les **pressions maximales atteignent leur maximum** juste avant la perte de contact, et sont **équivalentes entre antérieur** (200 N/cm²) et **postérieur** (180 N/cm²).

Le CFL maximal augmente à 0,7 bien au-dessus du coefficient de friction à l'interface béton-pied (75).

f. Bilan de la phase d'appui physiologique du bovin

La phase d'appui mobilise différemment les pieds antérieurs et postérieurs.

Sur un antérieur, la pression exercée est **également répartie** entre onglon latéral et médial pendant toute la durée de la phase. La **pression moyenne est inférieure** à celle d'un postérieur mais les **pressions maximales sont supérieures** à celles d'un postérieur. Ce constat s'explique d'une part **par la surface de contact au sol plus grande qui permet de répartir la pression sur une plus grande surface**, d'autre part par le fait que **l'appui d'un antérieur se fait davantage sur la muraille abaxiale puis axiale de l'onglon latéral**. Or la corne de la muraille est plus dure que la corne solaire et ne bénéficie pas de l'amortissement apporté par les coussinets digitaux du bulbe : elle subit donc des **pressions plus élevées** qui augmentent fortement lors de la phase 5 car elle mobilise davantage la partie antérieure du pied et prépare une **protraction plus rapide** (cf. *Partie 2 I.3, p.74*).

Sur un postérieur, le comportement biomécanique est différent. **Le bulbe et la sole de l'onglon latéral** concentrent à eux seuls presque **toute la pression appliquée au pied dans la phase 1**. Bien que la surface de contact du pied augmente globalement, l'appui reste largement latéral et donc « incomplet », expliquant les pressions moyennes plus élevées par rapport à un antérieur.

La sur-sollicitation de l'onglon latéral s'explique par le fait que la **longueur du doigt latéral est plus élevée** et que les tendons extenseurs des doigts rapprochent le talon de l'onglon latéral du sol juste avant la phase 1 (7) (10). La différence entre un pied antérieur et postérieur est à attribuer à **l'anatomie différente des deux membres** : les **membres antérieurs sont attachés au tronc par une ensemble musculo-tendineux** qui permettrait à l'animal de **mieux compenser l'appui asymétrique** initial en début de phase 1. A l'inverse, les **membres postérieurs sont liés directement au bassin** par une « **charnière osseuse** » continue : les faibles mouvements de latéralité permis par les articulations du pied et du membre ne permettent pas de « transférer » l'appui vers l'onglon médial.

L'onglon latéral du pied postérieur subit donc le plus de contraintes lors de la marche physiologique du bovin.

Enfin, pendant toute la phase d'appui, le **CFS maximal est toujours inférieur au CFL**, ce qui signifie que le bovin **devrait glisser à chaque phase** (75). En réalité, le CDP de l'animal se situe à **la base du support formé par les trois autres appuis**, offrant une stabilité posturale qui diminue le CFL du pied sur le sol et l'empêche de glisser. Cette stabilité peut cependant être **diminuée par une lésion podale, un sol lisse, une vitesse trop élevée ou un mouvement brusque de l'animal** et ainsi provoquer **une glissade voire une chute**.

g. Cinétique de la phase de mobilisation du pied

Pendant la phase de mobilisation du pied, **les FRS ne s'appliquent pas** : le mouvement résulte donc uniquement des **forces actives musculaires et tendineuses**. Le pied n'ayant pas de muscle charnu, il n'est impliqué dans cette phase que par **ses tendons fléchisseurs et extenseurs** qui jouent un **rôle mineur** dans les différentes étapes de la phase de mobilisation, qui ne sera pas décrite ici.

3. Cas particulier de la station debout « immobile »

Lors de la station debout, la répartition des pressions engendrées par les FRS est **différente** par rapport à la marche (79) (10). Ainsi, la FRS ne s'exerce pas sur la muraille mais **uniquement sur la sole de façon non uniforme**. Les pressions les plus élevées s'exercent en **zone 6 de la sole sur l'onglon médial d'un antérieur** et sur la **zone 5 de la sole sur l'onglon latéral d'un postérieur (Figure 41)**. Cette différence est attribuée à **l'emplacement du centre de gravité de l'animal**, caudal aux membres antérieurs (d'où les pressions élevées dans la partie postérieure de la sole) et crânial aux membres postérieurs.

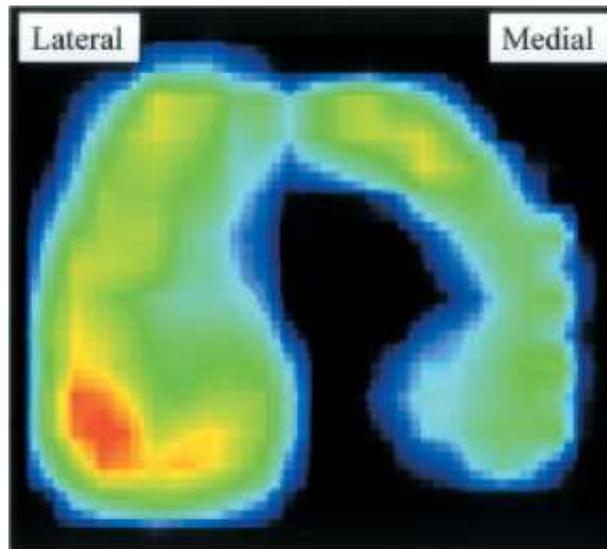


Figure 41 : Distribution de pression mesurée sur un pied postérieur gauche (79)

Les couleurs correspondent à la valeur de la pression mesurée par unité de surface (N/m²). De la plus basse à la plus élevée : bleu < bleu clair < vert < jaune < rouge.

Cependant, l'appui droit et immobile d'un bovin sur ses 4 membres **n'existe pas dans la réalité** : chaque membre ne supporte pas 1/4 du poids vif de l'animal de façon équitable sur ses 2 onglons à chaque instant (**Figure 42**, Cas n°1) (10) (80). Du fait du centre de gravité décalé postérieurement, environ 2/3 du PV sont supportés par les membres postérieurs et s'exercent sur les 2 onglons latéraux, les onglons médiaux se partageant le tiers restant.

La situation statique est donc différente de la biomécanique de la marche et n'a pas les mêmes conséquences pour un pied antérieur et un pied postérieur.

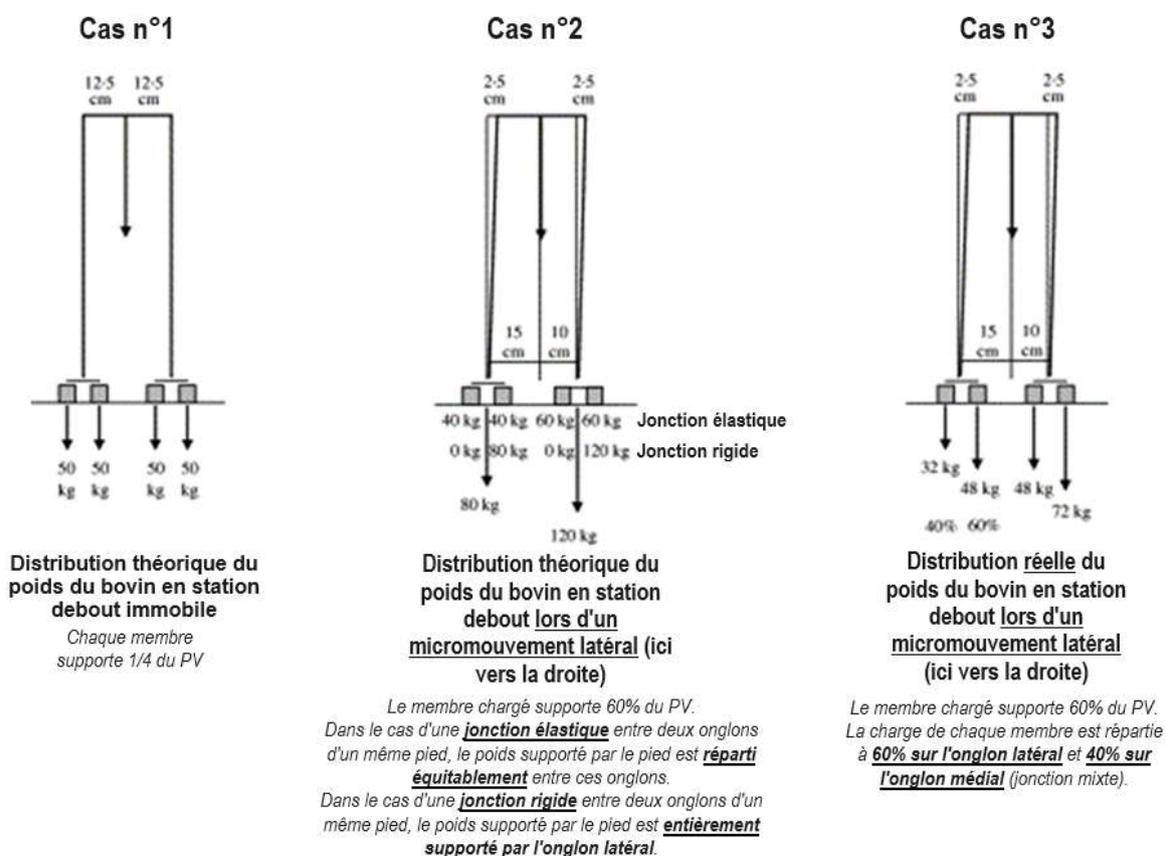


Figure 42 : Distribution du poids du bovin en station debout sur ses membres postérieurs (400kg) selon différentes hypothèses (adapté d'après (10))

La charnière osseuse continue des membres postérieurs permet au bovin d'effectuer en permanence des micromouvements latéraux de 2 à 3 cm par rapport à son centre de gravité, **soulageant un membre pour charger l'autre**. La jonction entre les onglons n'étant ni totalement rigide, ni totalement élastique (Figure 42, Cas n°2), et l'onglon latéral étant plus gros que l'onglon médial, **l'onglon latéral supporte davantage de poids (60 %) que l'onglon médial (30 %), en particulier pour le coté chargé**, quelle que soit l'amplitude des mouvements (Figure 42, Cas n°3). Bien que la surface de contact de l'onglon médial diminue, celle de l'onglon latéral ne varie pas. Ainsi, la **pression moyenne sur le bulbe de l'onglon latéral** du membre chargé est **deux fois supérieure à celle de l'onglon médial** (Figure 43) et la moyenne des pressions maximales est trois fois plus élevée ! Lors de ces micromouvements, les **onglons latéraux** subissent donc une **variation d'amplitude de charge bien plus élevée** que les onglons médiaux.

NB. Ces mouvements de variation de poids demandent une activité musculaire : celle-ci permet d'augmenter la circulation artérielle vers le muscle et de réduire la stase veineuse dans les muscles et dans les pieds, comme c'est le cas pour les humains (réduction de la fatigue musculaire et de l'inconfort (81)) (76).

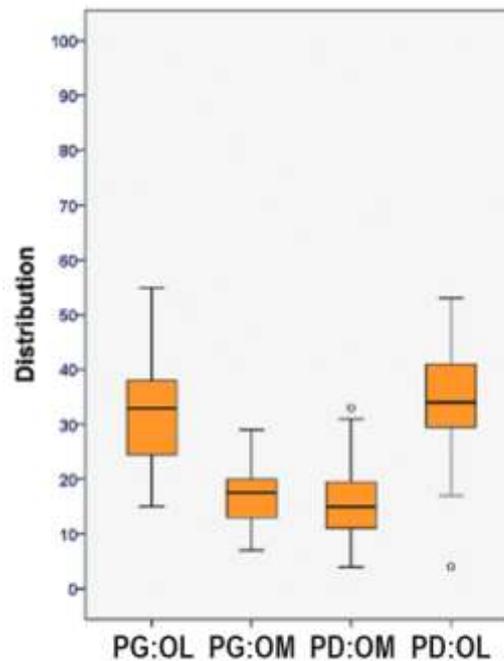


Figure 43 : Distribution des moyennes des pourcentages de FRS exercées sur les onglons postérieurs lors de la station debout (80)

Chaque onglon latéral supporte un tiers de la pression totale exercée sur les postérieurs, le tiers restant étant supporté par les deux onglons médiaux.

Ce même raisonnement ne peut s'appliquer aux membres antérieurs. Leur attache musculo-tendineuse au tronc redistribue le poids supporté par l'onglon latéral vers l'onglon médial qui se retrouve anormalement surchargé. Ainsi, c'est l'onglon médial antérieur qui subit la contrainte la plus forte (10) (7).

La station immobile debout n'est pas physiologique et provoque un stress supplémentaire pour les onglons latéraux postérieurs mais aussi un stress sur les onglons médiaux antérieurs.

4. Conséquences de la cinétique sur la boîte cornée et ses structures

a. Effets à court terme de la charge du pied

Les contraintes appliquées au pied lors de la marche ou de la station debout s'appliquent sur la boîte cornée et les structures internes au pied.

La marche provoque la **compression cyclique de la corne** alors soumise à des pressions moyennes élevées mais surtout à des **pressions maximales inégalement réparties** sur la surface du pied pouvant atteindre des valeurs **2 à 3 fois plus élevées que les pressions moyennes** (29). On estime que la compression engendrée par ces pressions atteint **50 à 60 % de la résistance à la compression** (estimée) pour la **corne du bulbe de l'onglon latéral**, et ce de façon répétée.

Lors de l'augmentation de la composante verticale de la FRS pendant la marche, la surface du pied en contact avec le sol augmente grâce à l'élasticité de la corne de la sole (s.s.) et du bulbe (**Figure 44**). Le CDP se déplace médialement et caudalement (73), de l'onglon latéral vers l'onglon médial, dont la surface de contact augmente le plus. **Même lorsque la charge ne varie pas** mais qu'elle est **appliquée sur la durée, le bulbe continue à se rapprocher du sol.**

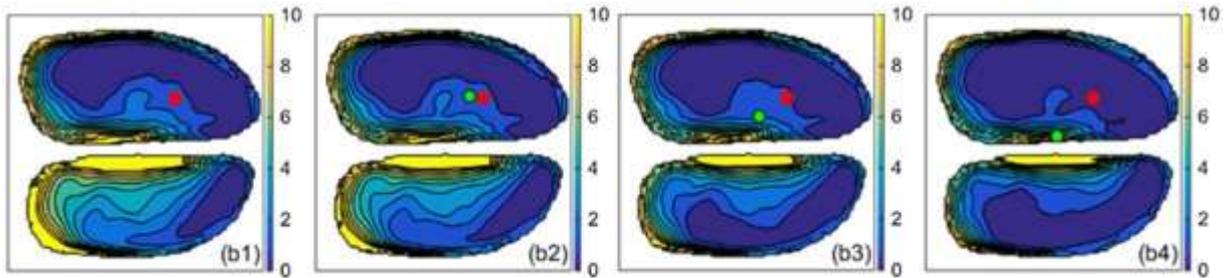


Figure 44 : Evolution de la surface de contact avec le sol et du CDP en fonction de la charge du membre (77)

(b1) Charge minimale (b2) Charge 10 % du PV sur 1min (b3) Charge 20 % du PV sur 1min (b4) Charge 35 % du PV sur 1min (Point rouge) CDP à charge minimale (Point vert) CDP pour la charge concernée. L'onglon latéral est en haut, l'onglon médial en bas. L'échelle de couleur désigne la hauteur par rapport au sol (bleu proche du sol à jaune loin du sol).

Ce n'est pas seulement la corne qui est comprimée (**Figure 46**) mais aussi **l'ensemble des tissus mous compris entre P3 et le sol**. La charge du poids du corps provoque la flexion des articulations IPP et IPD (pour rappel : de façon plus marquée sur IPD de l'onglon latéral) et **l'enfoncement progressif de P3 dans la boîte cornée**.

Lorsque cette flexion augmente, proportionnellement au poids appliqué, l'onglon médial se déplace médialement, augmentant l'écartement entre les onglons. L'onglon latéral supportant déjà une grande partie de la charge, **les forces de friction qui s'y appliquent sont plus élevées** et empêchent son déplacement latéral : **il subit donc une compression plus élevée que l'onglon médial** (77).

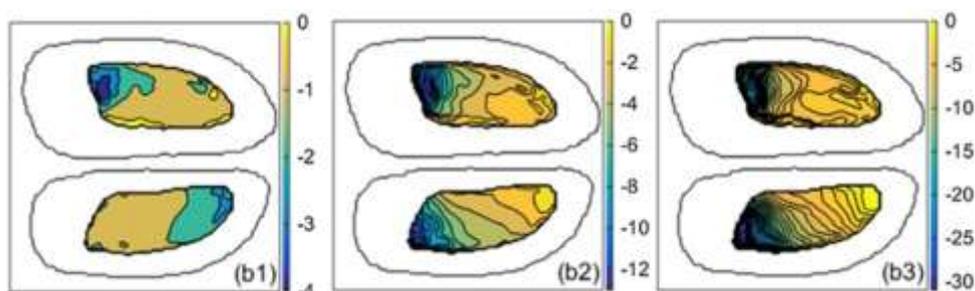


Figure 45 : Evolution de l'épaisseur des tissus mous entre sol et corne en fonction de la charge du membre (77)

(b1) Charge 10 % du PV sur 1min (b2) Charge 20 % du PV sur 1min (b3) Charge 35 % du PV sur 1min. L'onglon latéral est en haut, l'onglon médial en bas. L'échelle de couleur désigne le pourcentage de hauteur de tissus mous par rapport à l'épaisseur initiale (jaune épaisseur légèrement diminuée → bleu épaisseur largement diminuée).

L'enfoncement de P3 est limité par la **tension du tendon du perforant** (40) et **l'extension limitée de l'appareil suspenseur de P3**. (77) Cependant, lorsque la charge est appliquée sur la durée, l'écartement entre les deux onglons ne varie plus (73) mais P3 **continue à se déplacer distalement** et la compression s'accroît d'autant plus. *In vitro*, cette compression est identique entre onglons médial et latéral à partir d'une charge de 20 % du PV (**Figure 45**) mais *in vivo* la charge est bien plus dynamique (29). De ce fait, **l'enfoncement de P3 comprime d'avantage les tissus mous du talon**, en particulier ceux situés **entre le *tuberculum flexorium* et le sol**, et moins ceux situés à l'apex du pied. **Les coussinets digitaux** remplissent alors pleinement leur rôle et **atténuent la compression du derme solaire** en se **déformant**. Par ailleurs, cette déformation permet de **comprimer le réseau veineux du pied** et agit donc en tant que **pompe veineuse du pied**.

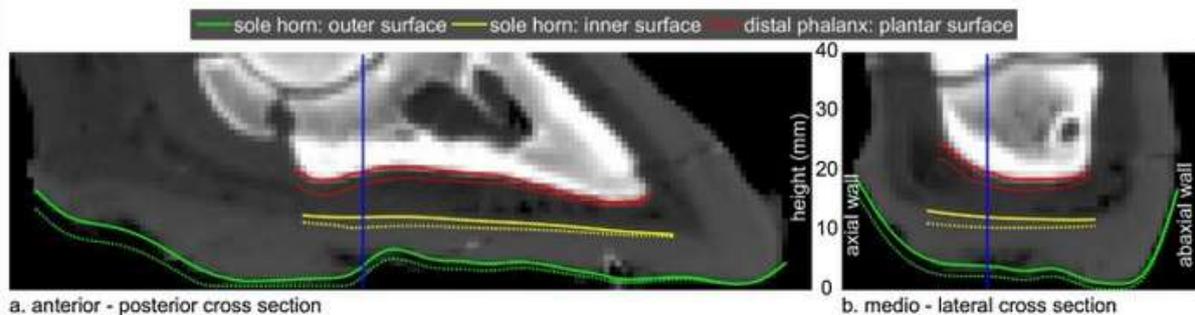


Figure 46 : Variation de la hauteur externe (vert) et interne (jaune) de la sole et de la face solaire de P3 (rouge) d'un onglon latéral postérieur sous l'effet d'une charge minimale (lignes complètes) et d'une charge à 35 % du PV (lignes pointillées) (77)
Épaisseur moyenne à charge minimale : 6,6 mm (tissus mous), 8 mm (corne solaire)

b. Effets à long terme de la charge du pied et lésions mécaniques associées

La compression à court terme des tissus mous sous le pied n'entraîne pas de modifications morphologiques majeures de structure ou de composition du pied. En revanche, la **compression répétée ou anormalement prolongée** des tissus mous entraîne des conséquences néfastes à **moyen-long terme**.

A moyen terme, **la sollicitation répétée des coussinets digitaux** de la sole amplifie leur effet de **pompe veineuse**, ce qui **accélère le rythme de la kératogénèse de la boîte cornée**. Ainsi, très tôt dans la vie de l'animal, **l'onglon latéral postérieur est hypertrophié** par rapport à son homologue médial (29). Cette hétérogénéité de taille physiologique s'observe d'autant plus que l'animal est âgé. (82) Elle est **à l'origine** de la dissymétrie entre les onglons latéral et médial **qu'elle amplifie progressivement**, provoquant la **sur-sollicitation de l'onglon latéral postérieur**. Dans le cas d'un antérieur, l'appui étant plus équilibré grâce à la jonction souple au tronc et au doigt médial plus court, l'enfoncement de P3 dans le pied comprime moins les coussinets digitaux : **ainsi, la taille des deux onglons d'un antérieur est similaire**.

A plus long terme, l'enfoncement répété de P3 dans la boîte cornée (de même que le vieillissement et l'augmentation du PV de l'animal, trois facteurs intimement liés) provoque le **remplacement progressif du tissu adipeux des coussinets digitaux par du tissu conjonctif (Figure 47)** au niveau des zones où il est le plus sollicité (*cf. Partie 1 II.4.c, p.54*), en particulier **sous le *tuberculum flexorium* des onglons latéraux postérieurs lors de la marche**. Les coussinets digitaux n'assurent plus leur rôle d'atténuation de la compression.

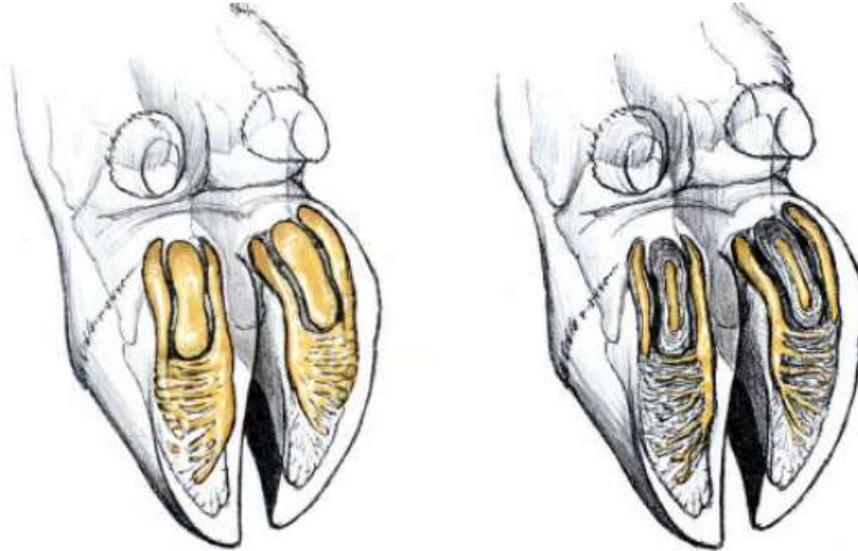


Figure 47 : Illustration du remplacement progressif du tissu adipeux des coussinets digitaux par du tissu conjonctif et leur diminution de taille sous l'effet de l'enfoncement chronique de P3 dans la boîte cornée (33)

(cette illustration s'applique également lorsqu'on compare une primipare et une vache ayant eu plus de 3 veaux, cf. Partie 1 Les coussinets digitaux, p.52)

En conséquence des deux phénomènes (qualité du tissu adipeux et augmentation de la kératogénèse), le **tissu velouté richement vascularisé est comprimé de façon excessive/répétée** par des charges appliquées sur la durée (77). Cette compression est à l'origine de lésions de la microcirculation provoquant des **hémorragies du derme** et des **ischémies altérant secondairement la kératogénèse et l'élaboration de la corne**. Ces lésions sont concentrées sur le **derme solaire**, particulièrement en **zone 4 de l'onglon latéral postérieur** qui subit les compressions les plus fortes et répétées (**Figure 48**).

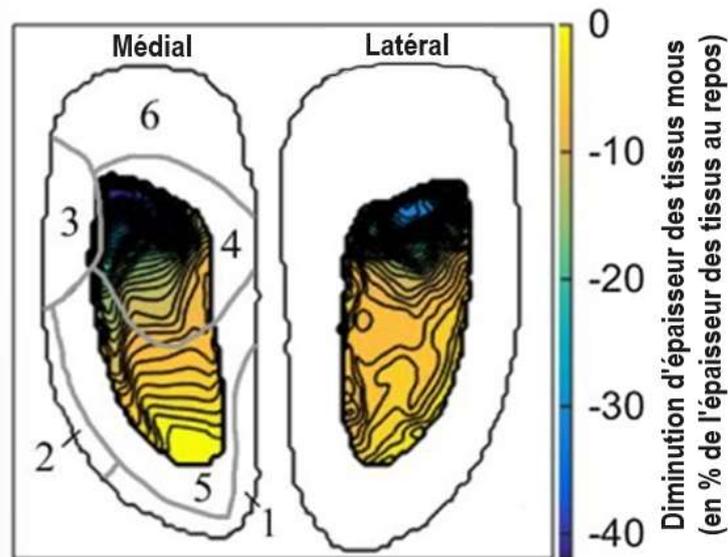


Figure 48 : Corrélation de l'épaisseur des tissus mous entre sol et corne avec les zones utilisées pour mieux situer les lésions podales lors de l'appui (77)

Cas d'un membre chargé à 35 % pendant 20 minutes. Numérotation en 6 zones selon la convention établie au 6^{ème} symposium international sur les maladies du pied de bovin (Liverpool, UK, 1990, (11))

Ce premier stade pathologique n'est pas immédiatement visible par l'éleveur. Quelques semaines après la survenue de ces lésions (durée correspondant au turnover de la corne solaire), elles apparaissent à la surface solaire sous la forme d'une **corne rougeâtre dans le cas d'une hémorragie du derme solaire**, formant une lésion nommée **bleime circonscrite** lorsqu'elle se situe en zone 4 ou **bleime diffuse** sinon (**Figure 49**) (34). L'ischémie perturbe la kératogénèse, ce qui s'observe par une **corne jaunâtre et friable facilement dépressible** au toucher (23) (14).



Figure 49 : Lésions de bleime circonscrite (étoiles) et de bleime diffuse (en rouge clair) sur les deux onglons d'un pied de bovin

L'apex de l'onglon à gauche est très usé, révélant partiellement le tissu velouté mis à jour par le parage.

Si beaucoup de débris cellulaires et de sang s'accumulent et s'incorporent à la corne solaire, **leur décomposition** entraîne ultérieurement un **vide** entre l'ancienne et la nouvelle corne saine, à l'origine d'une lésion nommée **doublement de la sole**, non visible de l'extérieur (**Figure 50**). Ces trois lésions ne provoquent que **peu de douleur** à l'animal (33).



Figure 50 : Onglon présentant une sole double, en vue latérale après avoir retiré la moitié de la boîte cornée (à gauche), et en vue sagittale après section et retrait de l'apex de l'onglon (48)

L'amplitude et la durée de la charge déterminent la sévérité des lésions tissulaires. A plus long terme, la contusion répétée du **tissu velouté** entraîne son **hypertrophie progressive** au détriment des coussinets digitaux devenus conjonctifs et de la **corne solaire amincie par l'usure excessive et le défaut de kératinisation** (corne de mauvaise qualité) (27).

Ainsi, dans les cas les plus extrêmes ou les plus chroniques, **le corium s'ulcère à la surface solaire du pied**, en dehors de la boîte cornée qui n'est plus synthétisée et ne le protège plus. Cette lésion est nommée **ulcère typique de la sole** lorsqu'elle apparaît en zone 4 ou simplement **ulcère de la sole** sinon (34) (**Figure 51**). Cette lésion, très douloureuse pour l'animal, a de graves conséquences en termes économiques et de bien-être animal (41).



Figure 51 : Onglon latéral postérieur présentant un ulcère typique de la sole en zone 4 (source Youtube)

5. Perte d'intégrité de l'appareil suspenseur de P3 : conséquences cinétiques et lésions mécaniques associées

Pour rappel, l'association étroite entre le périoste de P3 et le podophylle et le kéraphylle de la paroi est à l'origine de l'appareil suspenseur de P3 qui est essentiel car il **limite l'enfoncement de P3 dans la boîte cornée**. Contrairement au cheval, il **n'y a pas de cas rapporté de rupture complète de l'appareil suspenseur**. Cependant, **deux mécanismes principaux entraînent le relâchement de l'appareil suspenseur de P3 : la fourbure subclinique et la gestation** (12) (83).

a. Fourbure subclinique, cerclage de la muraille, seime cerclée, ouverture de la ligne blanche

La fourbure subclinique provoque un affaiblissement de la structure de la boîte cornée et de l'intégrité structurelle et fonctionnelle de l'appareil suspenseur de P3 (33) (23). Elle est le résultat d'une cascade d'évènement physiopathologiques provoquant d'une part la **micro-rupture des faisceaux de fibres de collagène reliant le périoste de P3 à la paroi** et d'autre part **perturbant la kératogénèse**. Le lien entre les différentes causes de la fourbure subclinique et ces processus pathologiques n'est pas encore totalement élucidé.

La fourbure subclinique est le résultat d'un phénomène inflammatoire généralisé, résultant d'une acidose ruminale subaiguë le plus souvent ou d'une endotoxémie, à l'origine d'une libération d'endotoxines dans la circulation sanguine. Ces endotoxines provoquent une congestion et une augmentation de pression à l'intérieur de la boîte cornée, de l'œdème et une ischémie secondaire, une extravasation de fluides et de sang et potentiellement de la nécrose/mort cellulaire, avec pour conséquence finale sur la paroi un **relâchement de l'appareil suspenseur de P3**. L'altération de la microcirculation du pododerme perturbe la kératogénèse de l'ensemble des tissus cornée, particulièrement :

- Le derme coronal cesse de produire de la corne ou en produit en excès, ce qui se manifeste extérieurement par des creux et crêtes horizontales sur la corne (lésions nommée **cerclage de la muraille**) ou dans les cas les plus sévères par des fissures horizontales (lésions nommées **seimes**) (**Figure 52**)
- Le derme solaire produit une corne de mauvaise qualité ou parfois n'en produit plus, donnant lieu à un **doublement de la sole** (cf. infra).
- (38) Le derme pariétal lamellaire est le moins vascularisé et ne produit presque plus de corne. Avec l'augmentation de pression à l'intérieur de la boîte cornée, la structure déjà fragile de la ligne blanche est altérée et une **ouverture de la ligne blanche** se produit (78). Cette lésion est un point d'entrée idéal pour un corps étranger (pierre...) qui peut entraîner une infection ascendante jusqu'au corium, où se forme un abcès causant une boiterie très douloureuse (33) (12). L'ouverture de la ligne blanche se produit le plus souvent à son **extrémité abaxiale** car les pressions y sont plus fortes et la région concernée supporte l'impact lors de la marche. Les maladies de la ligne blanche représentent la 2ème affection podale la plus fréquente après les ulcères de sole (18).

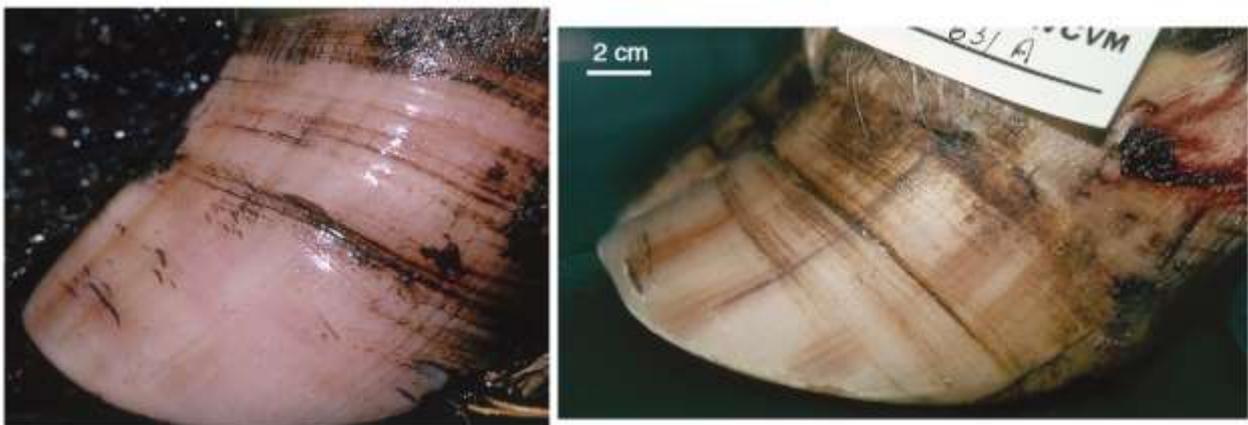


Figure 52 : Cerclage de la muraille (à gauche) et seime cerclée (à droite) sur un onglon de bovin (23)

b. La période péri-natale

Pendant la **période péri-natale** (trois semaines avant vêlage), **sous l'effet des hormones de la mise-bas et de la lactation** (la **relaxine** aux effets de remodelage du collagène et les **œstrogènes**), les **lamelles pariétales** s'enrichissent en tissu conjonctif et **augmentent en épaisseur** (41) (78). Ainsi, la **structure de la jonction podophylle/kéraphylle se désorganise**, les lamelles ne sont plus perpendiculaires à la corne pariétale. Ainsi, la **capacité d'extension de l'appareil suspenseur de P3 augmente** : il se relâche, ce qui entraîne un **enfoncement plus important de P3 dans la boîte cornée**, sans qu'aucun phénomène inflammatoire ne soit impliqué en premier lieu (**ce n'est donc pas une pododermatite** (33)). Pour les onglons antérieurs, ce phénomène se produit deux semaines avant vêlage, il est maximal quatre semaines après vêlage mais la structure est de nouveau normale à douze semaines après vêlage. Pour les **onglons postérieurs**, ces changements apparaissent plus tardivement mais augmentent en intensité **et persistent à douze semaines après vêlage (Figure 51)**. De nombreuses études ont montré une incidence plus élevée d'ulcères de sole des onglons latéraux postérieurs dans les dix semaines après vêlage.

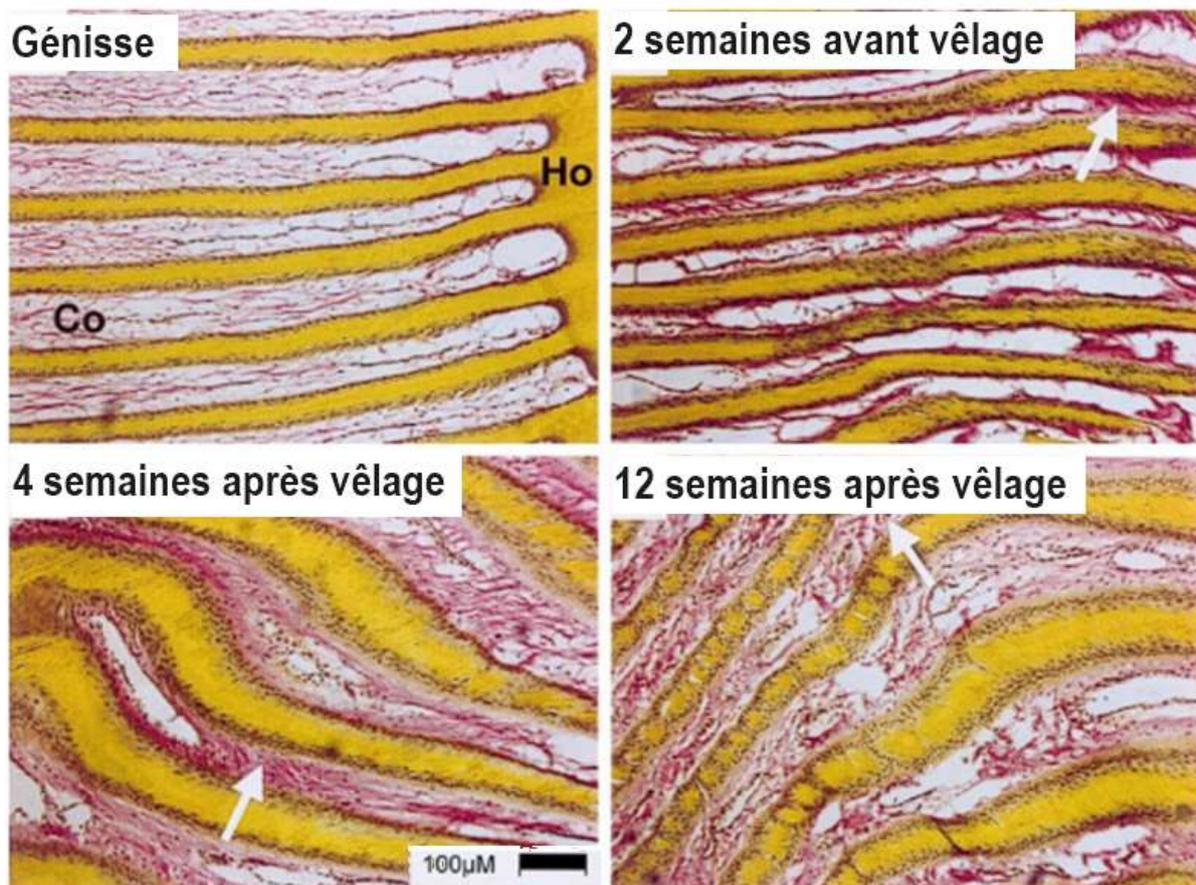


Figure 53 : Apparence histologique de la région lamellaire de la paroi d'un onglon latéral postérieur montrant la distorsion des lamelles dermales, microscope optique avec coloration à l'hématoxyline (78)

Corium en rouge, corne en jaune ; pour les antérieurs, la morphologie normale est retrouvée douze semaines après vêlage

Ainsi, la **fourbure subclinique** et la **période autour du vèlage** sont deux mécanismes différents ayant pour conséquence un **enfoncement plus important de P3 dans la boîte cornée**. Même si les causes de la fourbure subclinique se préviennent et que les modifications de l'appareil suspenseur lors de la gestation se résolvent après quelques semaines, **l'enfoncement distal voire la rotation de P3** (parfois jusqu'à 14 mm au niveau du *tuberculum flexorium* (34)) **est plus ou moins définitif**.

6. Variations cinématiques et cinétiques de la marche lors d'une boiterie

Une boiterie se caractérise par une **démarche volontairement anormale de l'animal** qui essaye de **réduire au maximum la douleur** ressentie par une lésion podale ou une lésion haute de l'appareil locomoteur. Longtemps, les boiteries ont été caractérisées par une **observation de la démarche et l'attribution d'un score de boiterie de 1 à 5** ; l'échelle la plus utilisée est celle de **Sprecher et al. (1997) (84) (Tableau 2)** et beaucoup d'autres sont souvent dérivées de cette même échelle . Cependant, malgré le fait que beaucoup d'études ont prouvé l'efficacité « raisonnable » et la répétabilité inter/intra-observateur de ce système, il reste **peu sensible** pour détecter des boiteries légères et **demande du temps et une certaine expérience** de la part de l'observateur (85). De nouvelles **méthodes automatisés** mesurant les variables liées au mouvement du membre ou à la FRS semblent prometteuses (86) (87). On décrit dans cette partie les **critères cinématiques et cinétiques qui varient lors d'une boiterie** liée à une lésion podale.

Score/Niveau	Démarche irrégulière	Dos arqué pendant la marche	Dos arqué en station debout	Longueur de pas diminuée	Hochement de la tête	Membre affecté évident	Réticence à supporter le poids
1 = Normal	NON	NON	NON	NON	NON	NON	NON
2 = Démarche irrégulière	OUI	OUI	NON	OUI (parfois pas évident)	NON	NON	NON
3 = Boiterie légère	OUI	OUI	OUI	OUI	NON	NON	NON
4 = Boiterie	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	NON
5 = Boiterie sévère	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI

Tableau 2 : Echelle de score de boiterie selon les critères proposés par Sprecher et al (1997) (84)

D'un point de vue cinématique, une boiterie fait **ralentir un bovin** (56, 84). Un bovin avec un ulcère de la sole marche plus lentement (0,9 m/s), montre une durée de pas augmentée (1,48 s), une **durée d'appui moyenne augmentée** (0,91 s), un temps de triple support supérieur au temps de double support (42 %) (**Figure 54**). La **longueur de pas est diminuée** (130 cm) et la hauteur maximale du pied pendant la phase de mobilisation est diminuée (9,6 cm) mais atteinte plus précocement, si bien que la durée de la phase est presque identique. Ainsi, **en ralentissant la vitesse de chaque pied, la charge du pied lésé est plus progressive et réduit les pics de pression et l'impact ; en augmentant le temps de triple support, le temps de charge sur le pied lésé diminue et la charge est reportée sur l'onglon controlatéral**. Ces différences sont d'autant plus visibles que les lésions de la sole sont graves, elles ont toutes pour objectif de **réduire la douleur**.

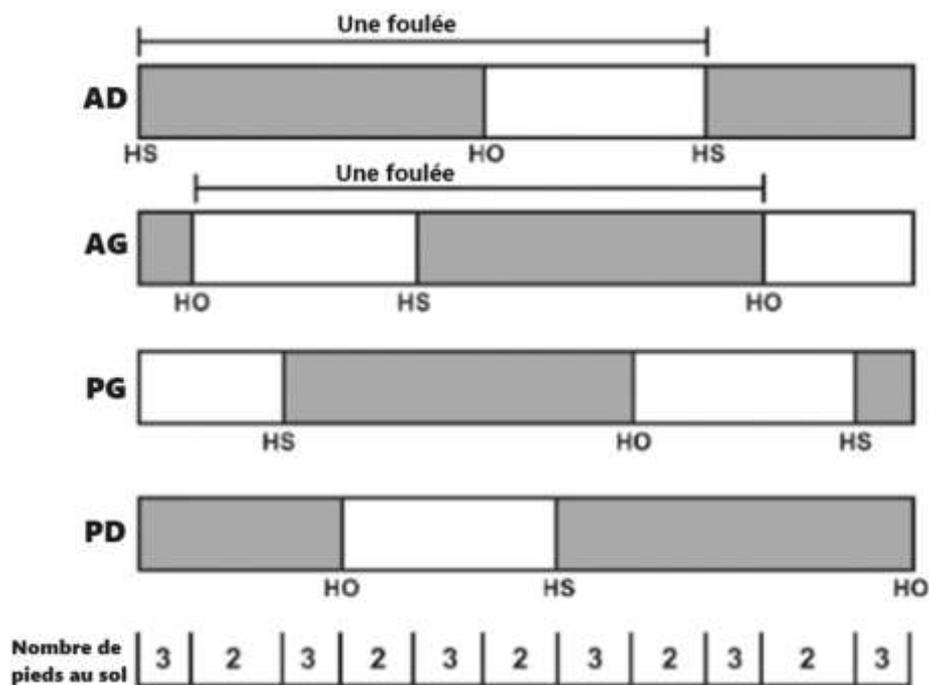


Figure 54 : Proportions de double et triple support pendant la foulée pour chaque membre pour des bovins avec des ulcères de sole (56) (à comparer avec Figure 31)

(HS) Début de phase 1 (HO) Fin de phase 5 (Gris) Phase d'appui (Blanc) Phase de mobilisation

Une lésion podale unilatérale d'un postérieur engendre une différence de durée absolue de la phase de mobilisation entre les membres postérieurs : un seuil de **2,5 %** de différence entre ces durées, mesurées avec des accéléromètres fixés au métatarse, permettrait de détecter les lésions podales unilatérales avec **une sensibilité et une spécificité de 100 %**.

En termes de cinématique d'angle, **l'hyperextension du boulet et la flexion de l'articulation IPD** sont les **indicateurs les plus sensibles de boiteries**. Pour une boiterie modérée à sévère, la variation d'amplitude de l'angle du **membre antérieur** par rapport à la verticale est moins élevée car **l'angle de rétraction en phase 5 est diminué**. Pour les **postérieurs**, c'est **l'angle de protraction à la phase 1 qui diminue** à cause de la diminution de l'extension de l'articulation du pied. Ces modifications visent à **diminuer la pression exercée sur P3 et donc la douleur**. D'autres variables cinématiques telles qu'un **dos arqué** et une **tête basse** peuvent aussi indiquer une boiterie.

Enfin, d'un point de vue cinétique, **la composante horizontale de la FRS du pied lésé est réduite à l'étape 2 (freinage) et encore davantage à l'étape 4 (accélération)** grâce à la **réduction de celle du pied controlatéral**. La composante verticale de la FRS est diminuée sur le pied lésé au préjudice des autres membres : **la vache reporte son poids activement vers le membre controlatéral ou vers l'onglon médial du pied lésé**. La différence entre les FRS verticales des membres ipsilatéraux est très spécifique (identification des vaches saines) mais peu sensible : la mesure des composantes horizontales et transverses permet d'atteindre une sensibilité supérieure à 90 %. **Ce déséquilibre de FRS s'efface sept jours après un parage curatif**.

III. Le parage préventif : intérêt, principe et conséquences biomécaniques

Comme écrit en introduction, les **boiteries d'origine podale** ont une incidence majeure en élevage bovin laitier aujourd'hui et constituent le **3^{ème} motif de réforme**. Certaines lésions podales mécaniques s'expliquent par des effets cinétiques et biomécaniques, liés à la physiologie et aux **modes de vie actuels des bovins**.

Dans cette partie, nous expliquons ces facteurs d'influence selon l'environnement et le mode de vie, soulignant l'intérêt du **parage préventif danois** dont on détaille le **principe** et la **technique de réalisation** ainsi que **son effet sur la biomécanique du pied**.

1. Les facteurs de risque des lésions podales

a. Le budget temps et le temps passé debout

Le temps passé couché est **l'indicateur le plus significatif du bien-être d'un bovin** dans l'organisation de son budget temps : **il est naturellement compris entre 9 et 12 heures par jour** (88) (89).

Avec **l'augmentation de la taille des cheptels** le temps de traite total peut atteindre **4 heures**, ce qui entraîne un **comportement de frustration** visible chez les bovins. Ainsi, selon l'ordre de passage de chaque animal à la traite, un bovin peut **rester debout en aire d'attente** de quelques minutes à **plusieurs heures, selon** la distance entre le bâtiment de traite et la pâture il peut marcher **plusieurs kilomètres** par jour pour s'y rendre. Cependant, **le temps perdu** pour la traite ne **diminue** que **peu le temps couché sur la journée** car ce dernier est **absolument prioritaire** dans le budget temps : ainsi, le temps debout s'écoule **au détriment du temps passé à pâturer, à interagir avec le troupeau** etc...

Après la traite, il arrive de plus, en conduite d'élevage en bâtiment, qu'un bovin passe un temps bloqué au cornadis. L'usage excessif ou la conception non adaptée de ces cornadis est un facteur qui diminue d'autant le temps couché (90).

A ce jour et à notre connaissance, il existe cependant **peu de preuves scientifiques que le temps passé debout augmente la prévalence des boiteries**. Les éléments exposés précédemment sont cependant concordants pour que ce temps debout soit corrélé avec un certain type de lésions, comme les bleimes, et les ulcères de sole. L'effet du temps passé debout pourrait être particulièrement délétère pendant la période de transition (trois semaines avant et après le vêlage), lors du relâchement de l'appareil suspenseur de la phalange.

b. La rugosité du sol

A activité équivalente, un sol trop lisse ou trop souple entraîne une réduction du rythme d'usure de la boîte cornée. Pour un postérieur, cela conduira à une usure de la muraille et de la sole antérieure inférieure à celle de la sole postérieure qui supportera toujours le même poids (12) (49) (10). Ainsi, la **kératogénèse de la muraille tendra à dépasser son usure entraînant un changement la forme de la boîte cornée** : la **pince de la boîte cornée s'élève**, le talon se rapproche du sol et **l'angle du doigt diminue** (de 52° à 40° ou moins). Ce changement de forme entraîne une **malposition de P3** et un **changement d'angle de l'articulation IPP** qui **amplifie mécaniquement de façon répétée la charge sur le bulbe et la tension de l'appareil suspenseur de P3**. Consécutivement, **P3 s'enfonce dans le pied et comprime d'avantage le tissu velouté (Figure 55)**.

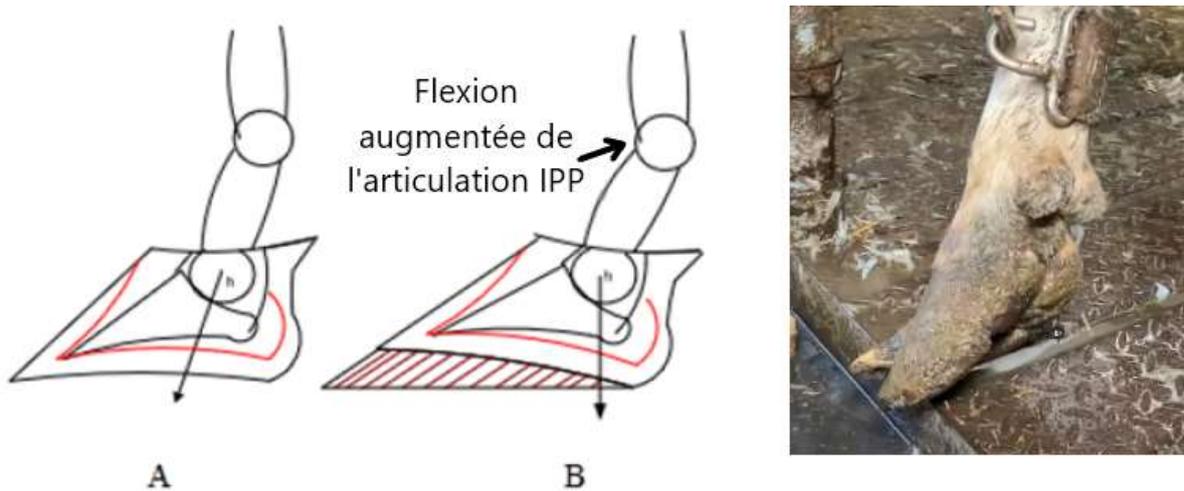


Figure 55 : Angles d'extension relatifs des articulations interphalangiennes sur un pied normal et sur un pied déséquilibré (60)

A l'inverse, un sol trop rugueux (béton abimé) ou des irrégularités du sol (chemins caillouteux) réduisent la surface d'appui de l'onglon donc augmentent les pressions moyennes exercées sur le pied (91) (29). Les reliefs du sol concentrent en des points isolés de la corne solaire et de la muraille des pressions maximales très élevées. En conséquence, ces zones s'usent plus vite et la boîte cornée se déforme, ce qui augmente la prévalence des lésions du pododerme et entretient un cercle vicieux.

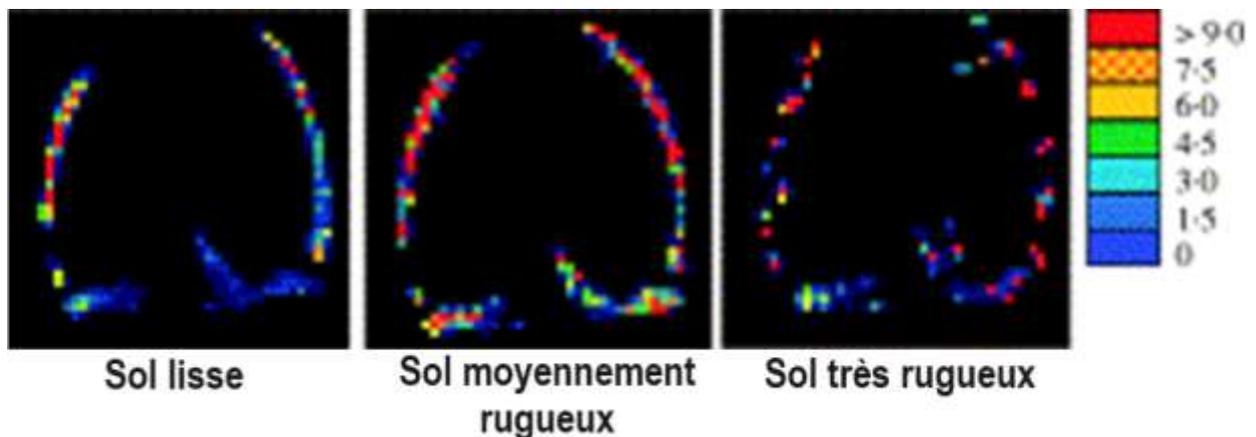


Figure 56 : Pressions (en MPa) exercées sur la boîte cornée en fonction de la rugosité du sol (91)

Enfin, la rugosité du sol est essentielle dans la prévention des glissades et la réduction des conséquences de démarrages ou arrêts brusques et soudains. Lors de ces derniers, l'amplitude de la composante horizontale de la FRS est presque doublée, ce qui augmente le CFL au-delà du CFS et donc occasionne une chute (75) (29).

Ainsi, **le bovin adapte sa démarche en fonction de la rugosité du sol**. Sur un sol lisse, il se déplace avec de nombreux pas de faible longueur (92). Au début de la phase d'appui, les membres antérieurs sont plus verticaux et les articulations sont plus fléchies. Plus la rugosité du sol augmente, plus la fréquence des pas diminue au profit de la longueur car le CFS est suffisamment élevé pour éviter une chute. **Au-delà d'une certaine rugosité**, la durée de la phase de mobilisation augmente au détriment de celle de la phase d'appui pour réduire la friction au sol, tout en conservant une longueur de pas élevée, ce qui rend la vitesse constante. Le CFS optimal pour un déplacement sans adaptation du bovin est estimé entre 0,4 et 0,5.

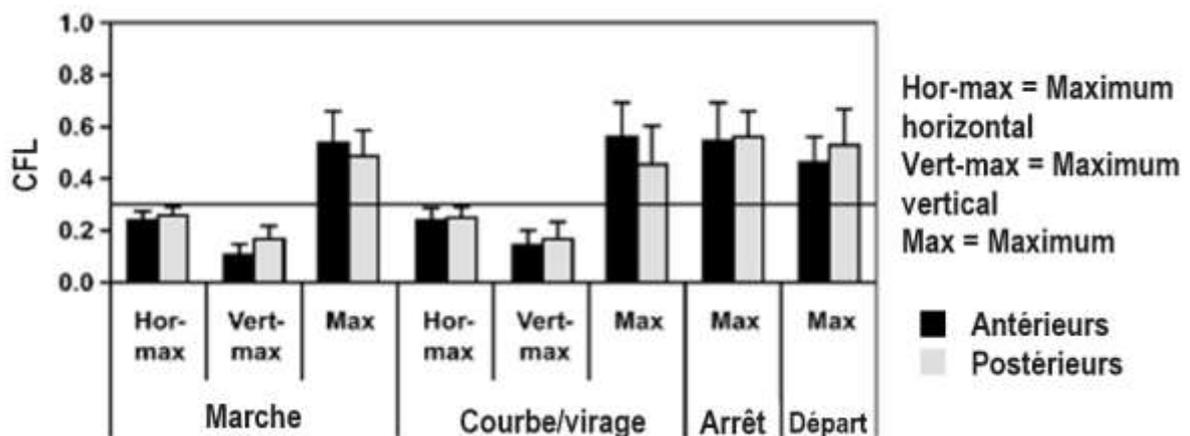


Figure 57 : Comparaison du Coefficient de Friction Statique (CFS = 0,3) et du Coefficient de Friction Limite (CFL) entre sol bétonné et pied pour différents comportements (75)

2. La démarche en pâture : le gold standard des milieux d'évolution

On peut supposer **que les critères de démarche du bovin dans son milieu naturel d'origine sont optimaux et naturels pour l'animal** (93). Cette hypothèse est confirmée par de nombreuses études ayant montré **les effets positifs de l'accès à la pâture dans la réduction de l'incidence des lésions podales**, mettant en garde par ailleurs les systèmes type « **zéro pâturages** » qui se répandent en Europe (93). **La prairie herbacée représente donc le gold standard des milieux sur lesquels évoluent les bovins**, en offrant un confort optimal pour la locomotion, à condition qu'elle ne soit ni gelée, ni boueuse, ni trop caillouteuse.

Avant de décrire l'influence du bâtiment et de la conduite d'élevage sur les lésions podales, il est intéressant d'étudier la démarche d'un bovin dans son milieu historique de vie, c'est-à-dire **en pâture**, sur un sol meuble.

La démarche en pâture montre une durée de foulée plus courte que sur sol bétonné (1,4 s) avec une phase d'appui plus longue (68 %) et donc une phase de mobilisation plus courte (32 %). La vitesse (1,2 m/s) et la longueur des pas (1,5 m) sont plus élevées. **Les deux onglons d'un pied s'enfoncent simultanément dans le sol, sans mouvement de bascule cranio-médial.** L'accélération aux étapes 1 et 5 des postérieurs est aussi plus élevée ce qui évoque une démarche plus assurée permise par un effet de traction plus important. La démarche apparaît plus détendue, la transition d'appui entre onglon latéral et médial est plus douce car l'onglon médial ne subit pas de mouvement involontaire et l'espace interdigité est plus resserré (58).

D'un point de vue cinétique, un sol meuble apporte un **équilibre optimal entre usure et kératogénèse** ainsi qu'une **charge « naturelle » de l'onglon** (94). L'onglon médial supporte d'avantage le poids du corps au début de la phase d'appui, ce qui diminue les pressions maximales sur l'onglon latéral et permet de mieux répartir les pressions moyennes sur une surface plus grande (58).

La comparaison entre la démarche en pâture et celle sur différents types de sol et leur influence sur l'incidence des lésions podales donnent des résultats variables selon les études, selon qu'elles prennent en compte ou non l'activité du bovin sur le sol concerné et la rugosité de ce dernier. Par souci de simplification, **on comparera ci-dessous la démarche sur sol dur et sur sol souple, sans tenir compte d'autres paramètres tels que le revêtement du sol** (61).

3. La démarche sur sol dur et sur sol souple

Un sol dur est fait le plus souvent de béton ou de goudron. Sa rugosité dépend du rendu final obtenu après séchage du matériau : un sol bétonné lisse ne sera pas du tout rugueux, un béton rainuré sera moyennement rugueux et un béton brossé sera très rugueux, avec les conséquences évoquées ci-dessus (**Figure 56**).

L'étude biomécanique du pied de la seconde partie de cette thèse ayant pris pour postulat de départ le déplacement d'un bovin sur un sol dur, on ne décrira pas de nouveau ces éléments. La démarche sur sol dur provoque des **pressions moyennes plus élevées sur le pied et concentrées sur l'onglon latéral d'un postérieur** lors du mouvement ou médial d'un antérieur lors de la station debout. A long terme, elle provoque un **enfouissement de P3** dans la boîte cornée et des lésions du pododerme solaire pouvant aller jusqu'à son ulcération. Ainsi, l'incidence des boiteries et des lésions podales sur sol dur est plus élevé qu'en pâture (95).

Un sol souple est constitué le plus souvent de **tapis en caoutchouc**. Les sols souples sont devenus des alternatives populaires au sols durs dans les zones de déplacement du bâtiment (salle de traite, couloir d'alimentation).

Par rapport à un sol dur, un sol souple permet de **réduire les pressions moyennes exercées sur le pied** (et donc le pododerme) mais leur **répartition reste inégale** (93) (96). Il n'y a pas de différences cinématiques majeures : les pas sont décrits légèrement plus longs (70 cm) et certaines études rapportent une vitesse plus élevée. De plus, l'élasticité d'un sol en caoutchouc entraîne sa déformation lors de l'appui, ce qui augmente le CFS et donc réduit le risque de glissade.

Dans les études, l'activité et le temps debout dans les zones de déplacement augmentent significativement tout comme le bien-être du bovin (97) : le nombre de pas par jour (5611 sur sol souple contre 4226 sur sol dur) et donc la distance parcourue augmente et devient similaire à celle parcourue en pâture, les comportements de chevauchements de chaleur sont plus fréquents, le temps de repos couché sur les tapis augmente, les moments de toilette (pendant lequel les animaux se tiennent sur 3 membres) sont 4 fois plus nombreux. Lorsque les animaux ont le choix de marcher sur un sol en béton rainuré ou en caoutchouc, 2/3 choisissent ce dernier. L'attrait pour ce revêtement de sol entraîne, dans ces dernières études, des comportements de dominance où les vaches dominantes s'en réservent l'accès (98) et d'autres problèmes tels qu'une incidence élevée de mammites d'environnement (sans consensus clair entre les études).

Un sol souple permettrait donc de réduire l'incidence de boiteries. Cependant, un sol souple a pour inconvénient majeur de **réduire l'usure de la boîte cornée** (99), pouvant provoquer à long terme **les mêmes conséquences que celles d'un sol dur et peu rugueux**, c'est-à-dire **la déformation de la boîte cornée et l'enfoncement excessif de P3 dans celle-ci**. Ainsi, l'installation de sols en caoutchouc n'est bénéfique dans la durée que si elle est accompagnée d'un parage préventif régulier.

Lorsqu'un bovin passe d'un bâtiment vers une pâture pendant un mois, sa démarche s'améliore et son score de boiterie diminue : il a moins de réticence à s'appuyer sur ses quatre pieds, la longueur de ses pas augmente progressivement lors d'un déplacement (100). De façon surprenante, son temps passé couché diminue : il est divisé en durées plus courtes mais plus nombreuses. **Ainsi, le transfert d'un bâtiment vers une pâture d'un bovin boiteux est bénéfique pour sa guérison.**

4. Objectif et technique du parage préventif danois

Il existe plusieurs techniques de parage préventif (49). La technique **la plus employée dans le monde** a été décrite par **Toussaint Raven en 1985** (10) : **la méthode danoise de parage** a posé les bases de ce que l'on appelle aujourd'hui **le parage préventif fonctionnel**.

L'objectif du parage préventif ou fonctionnel est de **rétablir l'équilibre biomécanique et fonctionnel de chaque onglon et du pied dans son ensemble** : le parage préventif s'exerce **sur un pied sain** dont la taille des onglons est trop grande en conséquence d'une marche sur sol dur entraînant une usure insuffisante. Il s'agit le plus souvent **d'un excès de croissance en pince**, situation précédant presque systématiquement l'apparition de **lésions podales**. S'il est bien exécuté, le parage préventif doit permettre de retrouver un pied tel que décrit dans la première partie de ce travail.

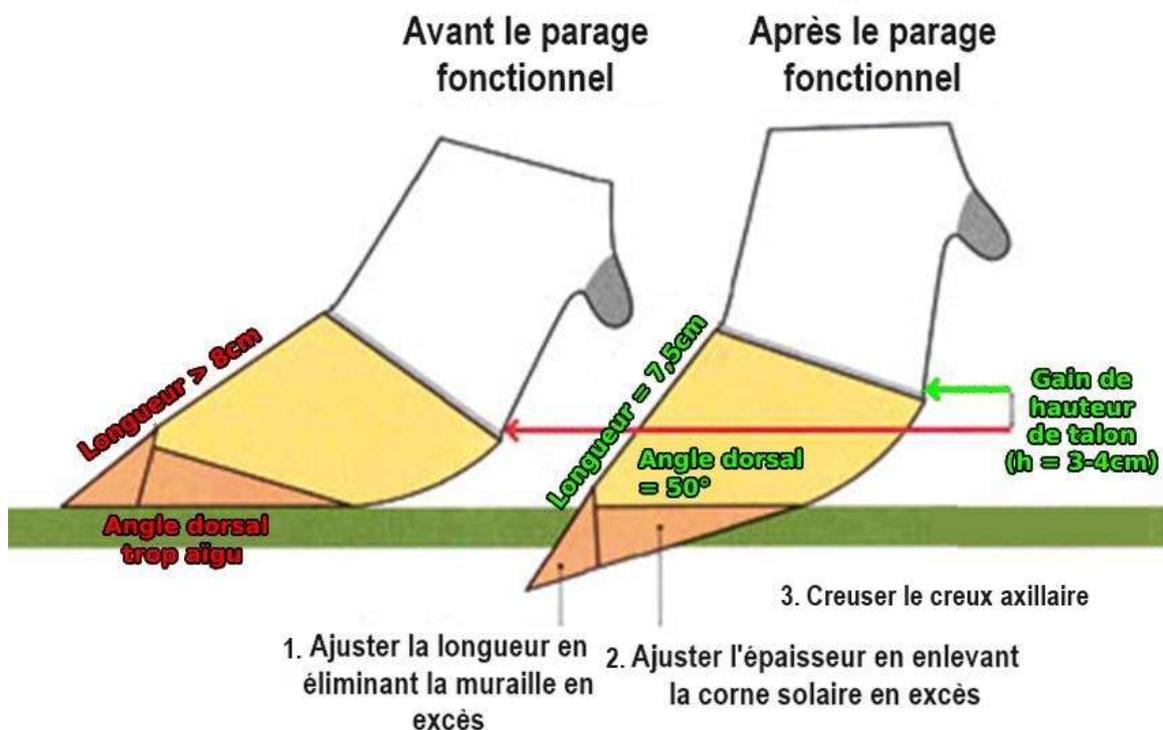


Figure 58 : Schéma expliquant l'objectif du parage préventif et son effet sur la forme de la boîte cornée de l'onglon (adapté du site de Nabu Altenburg)

Bien que la technique décrite soit valable pour tout pied de bovin, **le parage préventif doit en réalité s'adapter à l'animal, au pied et à l'onglon paré**, avec l'objectif principal de rétablir **un appui et une charge physiologique** (80) :

- **De l'onglon** en augmentant l'angle du pied pour rétablir un appui sur la muraille en pince (déplacement vers l'avant de l'appui),
- **Entre deux onglons voisins** en égalisant leur hauteur
- **Entre les quatre pieds de l'animal** pour assurer une stabilité posturale de l'animal.

L'application maîtrisée de cette technique selon un **rythme régulier** adapté à chaque élevage permet de **réduire significativement la prévalence des boiteries et lésions podales** (101). Il est conseillé de le faire **deux fois par an** mais bien souvent, il est effectué une seule fois par an, lorsque le troupeau commence à boiter ou au tarissement, ce qui dans ce dernier cas n'est pas stratégique compte tenu des effets de la gestation sur l'appareil suspenseur du pied. Il est plus pertinent de l'effectuer en milieu de lactation par exemple mais s'il est correctement réalisé, il peut être fait à n'importe quel moment de la lactation (101).

Technique du parage préventif fonctionnel danois adaptée pour tenir compte des variations individuelles (12) (102) (49) (17)

Après **contention adaptée** de l'animal pour travailler confortablement et en sécurité, on commence par **définir l'onglon le plus court comme onglon de référence**. Du fait de la différence de conformation et d'appui entre onglon latéral et médial, **l'onglon médial** est souvent moins déformé pour un **postérieur** et **sert de référence pour l'onglon latéral**. C'est l'inverse pour un antérieur où la différence de conformation est moins nette. **On décrit ici le parage d'un pied postérieur.**

La première étape consiste à **réduire la longueur de l'onglon médial** à environ 7,5-8,5 cm de longueur pour une Prim'Holstein (à adapter à la race, la taille et l'âge de l'animal). Puis **on égalise la longueur de l'onglon latéral** à celle de l'onglon médial pour **aligner l'apex** des deux onglons.

La seconde étape consiste à **aplanir la surface solaire de l'onglon médial** pour l'aligner avec sa muraille avec un angle de 50°, ce qui laisse en théorie une **épaisseur de sole de 5-7 mm**, qui reste à vérifier (13). On procède **de même pour l'onglon latéral** en alignant sa hauteur à celle de l'onglon médial. Bien souvent, il convient **d'éviter de parer le talon**, on réduit seulement l'épaisseur de sole antérieure et la muraille.

La troisième étape consiste à **créer un creux axillaire concave au niveau du site typique d'ulcère de la sole** en prenant garde à **ne pas entamer le tiers antérieur de la muraille axiale** pour préserver son rôle dans l'appui, et ne pas toucher à la ligne blanche, de longueur réduite en région axiale du pied. Le creux axillaire permet de **réduire la pression en regard du tuberculum flexorium** et d'en limiter les conséquences mais aussi **d'élargir l'espace interdigital** pour réduire les risques de maladie infectieuse interdigitée.

La quatrième étape consiste à **équilibrer la hauteur des talons si nécessaire**, pour que les surfaces solaires de chaque onglon soient planes, depuis l'apex vers le talon en passant par les murailles axiales et abaxiales. Le parage du pied est alors **terminé**.

Il est souvent **difficile d'égaliser la surface** de l'onglon latéral sur celle de l'onglon médial **sans amincir excessivement l'épaisseur de la sole latérale** (103) : **l'hypertrophie du tissu velouté de l'onglon latéral postérieur** provoque **l'amincissement de la corne solaire**, le rapprochant de la surface solaire. **Si la sole s'enfonce à la pression manuelle par l'opérateur, la sole a été trop parée.** Ainsi, une application (trop) stricte de la méthode Danoise, en particulier sur les grands onglons (bovin âgé ou lourd) peut favoriser l'apparition de lésions podales. Généralement, plus la longueur de l'onglon est faible, plus l'épaisseur de la sole est faible. Il en est de même pour le parage du talon latéral qui, s'il est trop fin ou trop bas, favorise respectivement l'apparition de dermatite digitée ou d'ulcères de sole.

5. L'effet du parage préventif fonctionnel sur la biomécanique du pied

Le parage préventif a des **effets bénéfiques sur la biomécanique de la marche** (104) (63). L'appui initial se fait davantage sur le talon de l'onglon latéral (+18-28 %) alors que son apex et l'onglon médial sont toujours suspendus (**Figure 59**). La démarche est également plus symétrique, la vitesse de déplacement plus élevée et l'extension du pied à la phase 3 plus élevée, traduisant une démarche plus confiante (60).

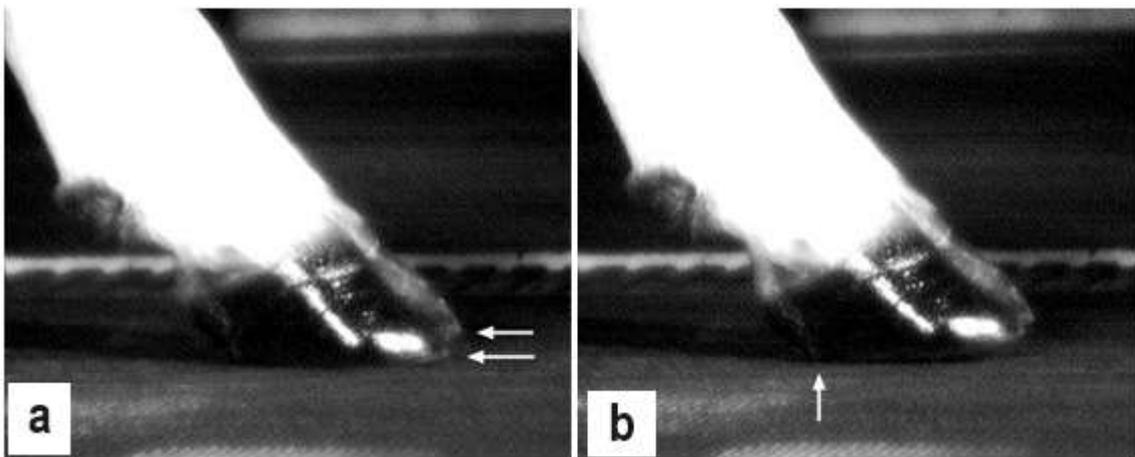


Figure 59 : Photographies du contact initial du pied avec le sol en début de phase d'appui avant (a) et après (b) parage préventif (63)

De nombreuses études ont trouvé que **le parage préventif** permet de **réduire significativement la fréquence des affections cliniques** mais aussi **subcliniques** du pied et de **diminuer la sévérité des boiteries qui en résultent** (101). En outre, il permet de diminuer la température du pied, qui est un facteur très fortement corrélé aux lésions de dermatite digitée (105) et qui permet de mesurer l'efficacité de la réalisation du parage (106).

Le résultat souhaité par Toussaint Raven dans la description de sa méthode de parage préventif est un **équilibre d'appui entre onglon latéral et médial** qui se **partageraient équitement** la charge du poids du corps et les pressions, afin d'éviter le déclenchement de la cascade pathogénique décrite précédemment (107) (104). Cependant, **cet objectif est inatteignable en réalité**. Le parage préventif permet de rééquilibrer le pied mais **l'onglon latéral supporte toujours la majorité (70 %) de la FRS (Figure 60)**. La **surface de contact avec le sol augmente** significativement (+45 %) grâce à la mise à niveau de la surface solaire, ce qui **diminue les pressions moyennes** exercées sur celle-ci (-30 %). Les pressions appliquées sur le talon diminuent également (-6 %). Cependant, **les pressions maximales ne diminuent pas** car la mise à niveau de la sole et de la muraille antérieure empêche cette dernière d'assurer son rôle de support au cours de la phase d'appui.

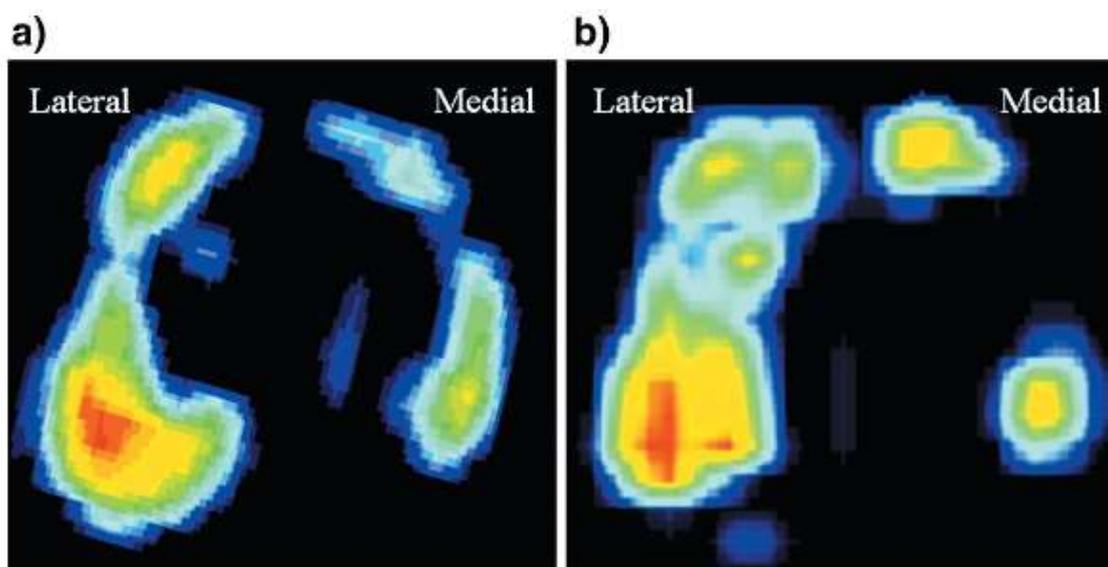


Figure 60 : Distribution de la pression sur un pied postérieur gauche d'un bovin avant (a) et après (b) parage fonctionnel danois (104)

En rétablissant l'angle du pied à sa valeur physiologique, le parage préventif déplacerait le CDP vers l'apex du pied mais cette comparaison est compliquée à cause de la modification de la surface de contact (79). Cependant, plusieurs études ont montré que 2 à 3 semaines après un parage fonctionnel, le CDP est de nouveau situé sur le bulbe de l'onglon latéral, et entretient la compression des tissus sous-jacents.

Ainsi, la méthode du parage préventif danois, bien que montrant des améliorations cinématiques et cinétiques de la démarche par rapport à un appui en pince, est imparfaite. Elle échoue à égaliser les pressions entre les deux onglons et à mieux répartir la pression de l'onglon latéral postérieur qui reste élevée dans la zone 4 typique des ulcères de sole. Ainsi, cette méthode doit être régulièrement répétée pour prévenir les lésions podales mécaniques précitées.

Les travaux de recherche tentent aujourd'hui de proposer **plusieurs voies d'améliorations** pour améliorer la biomécanique du pied en bâtiment pour la rapprocher de celle en pâture en agissant sur deux facteurs : **la structure du sol du bâtiment** et/ou **la méthode de parage** (104) (108). Pour cette dernière, **van der Tol** s'est appuyé sur la forme de la boîte cornée des bovins élevés en pâture dont **la muraille dépasse légèrement de la surface solaire** pour proposer une variation de la méthode de parage danoise. Il suggère de **laisser dépasser légèrement la muraille de la surface solaire** sur des onglons lors de la seconde étape pour que cette surface supporte les pressions les plus élevées, soulageant la sole et déplaçant le CDP vers l'apex du pied. **Cette méthode modifiée reste à étudier** : elle pourrait entraîner une flexion de la muraille sous l'effet des composantes verticales et horizontales de la FRS (qui n'a jamais été mise en évidence jusqu'ici), exerçant une tension sur la ligne blanche et potentiellement son ouverture. A notre connaissance, il n'y a aujourd'hui aucune méthode alternative de parage préventif ayant montré un meilleur résultat que la méthode danoise (109).

Le parage préventif Danois doit donc être considéré comme une **méthode imparfaite** dont l'objectif est, à partir d'un onglon en surcroissance, de rétablir un appui physiologiquement inégal du pied et de ses onglons avant l'apparition de lésions podales (104). Le parage préventif danois **n'est pas une solution définitive prévenant les boiteries** mais un **outil complémentaire de l'amélioration des conditions de déplacement et de vie des bovins en élevage en bâtiment**, deux éléments qui seront amenés à être améliorés dans le futur.

IV. Elaboration d'un modèle à visée pédagogique

1. Objectifs

Ce travail a pour objectif d'établir l'état actuel des connaissances relatives à l'anatomie et la biomécanique du pied de bovin lors de la marche ainsi que les lésions mécaniques pouvant les altérer. **Il s'achève par la réalisation d'un modèle synthétique, manipulable, d'un pied de bovin à visée pédagogique.**

La création de ce modèle répond à une **demande du corps enseignant de l'école vétérinaire VetAgro-Sup** souhaitant pouvoir utiliser des modèles lors des travaux dirigés et des travaux pratiques dispensés aux étudiants. Ce modèle répond également à un besoin souvent exprimé par les étudiants de **multiplication des types de supports d'apprentissages**, en particulier de **supports palpables et manipulables**, pour appuyer l'acquisition des connaissances théoriques. Ainsi, ce modèle s'inscrit pleinement dans la volonté de faire **évoluer l'enseignement des cours concernant le pied** et son fonctionnement mécanique en y apportant un nouveau moyen de présenter ces éléments.

L'objectif premier de ce modèle est **d'exposer les éléments** qui jouent un **rôle essentiel dans la biomécanique du pied** grâce à **leurs propriétés mécaniques de rigidité, de dureté ou de souplesse, de flexion et d'amorti**. En outre, l'importance de ces structures peut être mise en exergue par la **comparaison avec une situation pathologique** où une ou plusieurs de ces structures sont altérées et ne remplissent plus leur fonction. Il a ainsi été décidé de créer un modèle de pied composé **d'un onglon sain et d'un onglon avec un appui excessif en pince** mettant en évidence **l'intérêt du parage préventif (Figure 61)**.



Figure 61 : Vue d'ensemble du modèle pédagogique (source personnelle)

2. Matériel et conception

Pour concevoir un modèle entièrement synthétique qui ressemble à un vrai pied de bovin, nous avons décidé d'imprimer les tissus durs (phalanges, os sésamoides, boitier corné) puis d'utiliser d'autres matériaux pour créer les tissus mous.

Pour obtenir des tissus durs de forme précise, nous avons pris la décision de **réutiliser des pieds de bovins récupérés d'un abattoir**. Il a été possible de récupérer une diversité importante de pied parés et non parés pour sélectionner ceux dont les proportions se rapprochaient le plus d'un pied normal tel que décrit en 1^{ère} partie de cette thèse.

Ces pieds ont ensuite été numérisés **par tomodynamométrie** au scanner de VetAgro-Sup. L'imagerie par tomodynamométrie ou scanner CT (Computed Tomography) est une technique d'imagerie qui utilise des rayons X combinés avec l'informatique pour créer des images détaillées d'un objet. Elle fonctionne en faisant tourner une source de rayons X autour de cet objet et mesure l'intensité de ces rayons qui le traverse. Ces données sont ensuite traitées par un ordinateur pour produire des images transversales (en coupes) de l'objet. Pour créer un modèle en trois dimensions, la tomodynamométrie est idéale car elle fournit des **images plus détaillées des tissus** qu'elle **reconstitue en un objet visualisable et imprimable facilement**. Les études les plus récentes des lésions podales font appel à la tomodynamométrie pour mesurer les changements de conformation au sein de la boîte cornée par déplacement de marqueurs (73).

Les images de scanner ont été récupérées puis converties pour être **modélisées en objet 3D** sur le logiciel libre et gratuit Blender. La corne et les os ont été séparés entre eux et des autres tissus pour être visualisables et manipulables individuellement. Après une étape de peaufinage pour enlever quelques imprécisions et lisser certaines parties, **chaque élément est imprimé par une imprimante 3D avec du fil PETG** (polyéthylène téréphtalate glycol). **Les tissus mous n'ont pas été imprimés, ils ont été reproduits avec divers matériaux siliconés.**

L'assemblage de ces éléments avec les tissus mous a été réalisé en **deux présentations différentes**. Les matériaux utilisés sont indiqués en italique entre parenthèses.

a. Présentation n°1 : anatomie et propriétés mécaniques des composants de l'onglon médial

Pour cette partie du modèle, le doigt médial est laissé entier et le modèle est constitué de **couches successives amovibles**, destinées à être retirées les unes après les autres pour observer **leurs rapports, leur organisation et leurs caractéristiques (Figure 62)**.

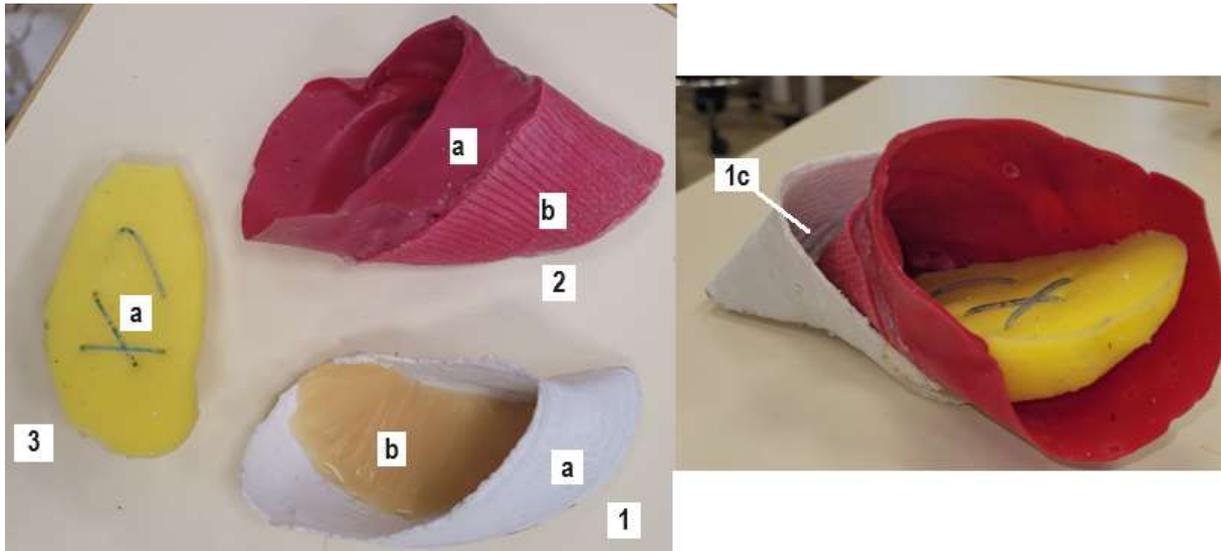


Figure 62 : Couches de l'onglon médial séparées (à gauche) et assemblées (à droite) (source personnelle)

1. Onglon médial avec muraille (a), sole (b) et kéraphylle (c) ; 2. Pododerme avec pododerme papillaire (a) et lamellaire (b) ; 3. Coussinet digital avec son réseau veineux (a)

La **corne** est la couche la plus externe, elle présente **différents niveaux de dureté et d'apparence** en fonction du segment concerné : la corne de la **muraille** (Figure 62, 1a) est **dure** et **non compressible** (*PETG, même matériau que les pièces osseuses*), la corne de la **sole** (Figure 62, 1b) est plus **molle** (*silicone dur*) et **s'enfonce** lorsqu'on appuie dessus. La **ligne blanche** fait la jonction entre muraille et sole en face solaire : elle est **légèrement plus dépressible que la sole** (*colle à silicone colorée en blanc*)

La couche suivante est celle du **pododerme** (Figure 62, 2) (*en silicone fin de couleur rose*). On observe la différence entre le **pododerme papillaire** (Figure 62, 2a) et la **structure particulière du podophylle** (Figure 62, 2b) (*bandage tubulaire strié recouvert de silicone rosé*). Cette structure répond au **kéraphylle à l'intérieur de la corne** (Figure 62, 1c) (*rainures creusées sur la face interne de la corne*).

La couche suivante est celle du **coussinet adipeux digital** (Figure 62, 3) (*silicone mou coloré en jaune*), **très dépressible** d'où son rôle d'amortisseur. Il est parcouru par des **veines** (Figure 62, 3a) (*tubulure contenant un liquide bleu*) dont le contenu est en mouvement lors de la pression du coussinet (**rôle de pompe veineuse**).

Après retrait de cette dernière couche, la **structure osseuse du doigt** (*PETG*) est **visible** ; on identifie les trois phalanges et les trois os sésamoïdes. Les **tendons perforant et perforé** (*silicone blanc « en corde » légèrement extensible*) ainsi que les **extenseurs communs et propres du doigt** (*silicone blanc « plat » extensible*) sont représentés avec leurs attaches aux os.

Lorsqu'on simule un appui sur cet onglon, **le pied se fléchit** (flexion prononcée des articulations interphalangiennes) : le manipulateur sent que le **talon du pied s'enfonce dans l'onglon**.

De façon complémentaire, il est possible de **retirer une ou plusieurs couches** avant de **remettre l'onglon corné en place sans la sole** (Figure 63). Ainsi, la **fenêtre en face solaire** permet d'observer l'extension de chaque tissu sous le pied : le coussinet digital ne recouvre pas l'apex de P3, le podophylle est absent en face solaire... Également, **lorsqu'on retire seulement le coussinet digital**, le ressenti lors de l'appui est beaucoup plus dur (révélant le rôle d'amortisseur du coussinet digital).

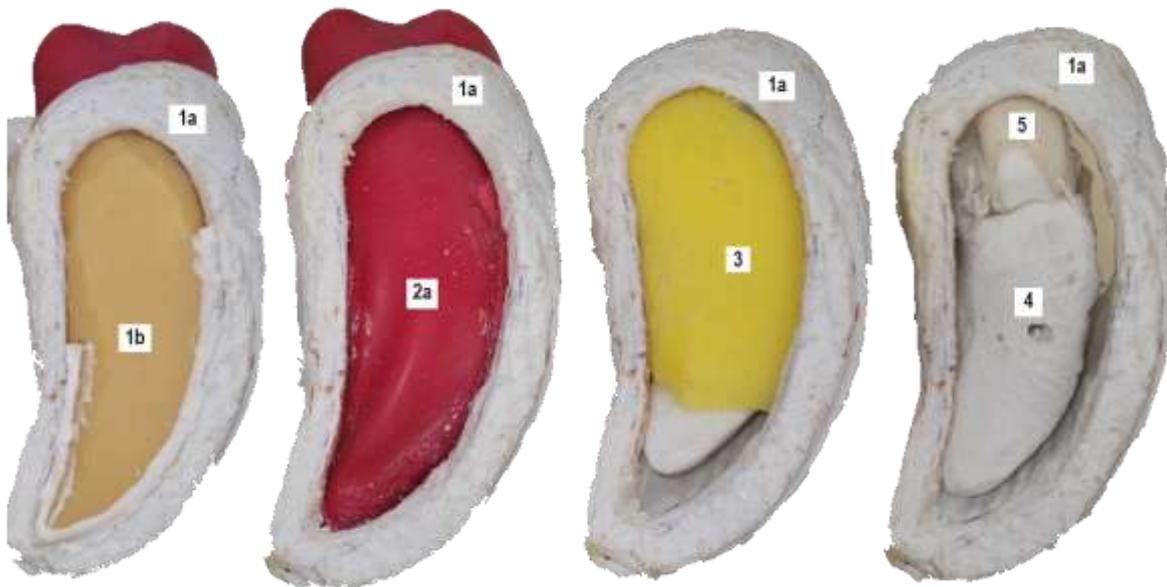


Figure 63 : Différentes vues des tissus podaux en face solaire avant et après retrait successif de couches (de la gauche vers la droite) (source personnelle)

4. Phalange distale = P3 ; 5. Attache du tendon perforant ; les autres légendes sont identiques à celles de la figure précédente

b. Présentation n°2 : comportement biomécanique de l'onglon latéral et comparaison avec un appui en pince

Pour cette partie du modèle, la **partie abaxiale** de la couche cornée **a été enlevée** pour laisser apparaître les **structures internes de l'onglon latéral** (Figure 64). L'intérêt de cette présentation est d'observer le **comportement des structures** internes du pied **lors d'un appui physiologique** et de le comparer avec celui d'un **onglon surélevé en pince**. Cette présentation permet donc de souligner **l'effet direct du parage sur l'extérieur et l'intérieur du pied**.



Figure 64 : Vue latérale du modèle pédagogique (source personnelle)

6. Tendon extenseur propre du doigt latéral ; 7. Tendon extenseur commun des doigts ; les autres légendes sont identiques à celles de la figure précédente

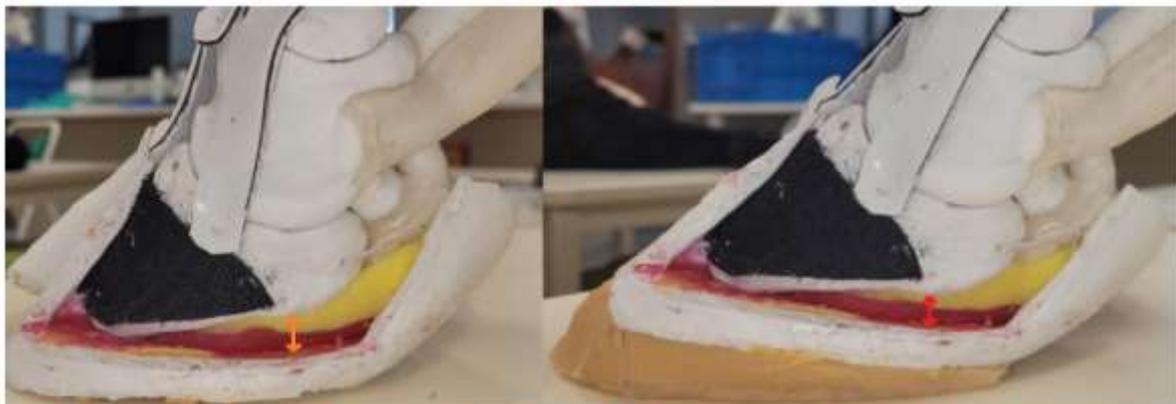
La corne et les tendons sont reproduits à l'identique de la présentation n°1. On peut cependant ajouter une **épaisseur de corne en face solaire** (*silicone dur aimanté*) pour reproduire un **appui en pince** et comparer les **caractéristiques morphologiques de la corne** avec et sans appui en pince (longueur de muraille, angle du pied...), la **modification de l'axe de la face solaire de P3** et la **réduction des angles des articulations interphalangiennes**.

La **troisième phalange** est attachée par sa **face axiale** (*bande adhésive scratch prolongée en face abaxiale pour être plus facilement observable*) à la corne pour reproduire l'**appareil suspenseur de P3**. Sa **face solaire** recouvre le **coussinet digital** (*silicone mou coloré en jaune*) d'épaisseur inégale ainsi que le **podophylle** (*silicone mou coloré en rose*).

Dans la **configuration initiale**, **P3 est suspendue** à l'intérieur de l'onglon (**Figure 65**, Cas n°1). Lorsque le manipulateur simule un appui **physiologique** (**Figure 65**, Cas n°2), l'enfoncement du pied s'observe par la **flexion des articulation interdigitales**, **l'enfoncement de P3** au niveau du talon et la **compression du coussinet digital et du pododerme**. Cet enfoncement est limité d'une part par **l'effet d'amortissement du coussinet digital** (ressenti par le manipulateur) et d'autre part par **l'extension limitée de l'appareil suspenseur de P3** (le manipulateur entend les scratches se tendre mais ils ne se séparent pas).



Cas n°1 : onglon sain sans application de force



Cas n°2 : onglon sain avec application d'une force (appui physiologique)

Cas n°3 : onglon anormalement élevé en pince avec application d'une force (appui pathologique)

Figure 65 : Biomécanique du modèle de pied selon différents appuis (source personnelle)
Les flèches montrent l'épaisseur des tissus mous entre la surface solaire de P3 et la corne solaire.

Dans sa **configuration pathologique** après **ajout de l'épaisseur supplémentaire de corne solaire en pince** (**Figure 65**, Cas n°3), l'enfoncement du pied provoque une **flexion exagérée des articulations interphalangiennes** et **l'enfoncement exagéré de P3 dans la boîte cornée**. Par rapport à l'appui physiologique, **l'enfoncement de P3** dans sa **partie postérieure comprime davantage le coussinet digital** et surtout le **pododerme**. Le **retrait de l'excès de corne, d'abord à l'apex** (réduction de la longueur de la muraille) **puis en face solaire** (mise à plat de la surface solaire) **résume les étapes du parage fonctionnel** pour retrouver un appui physiologique.

3. Discussion

En théorie, il serait idéal que le modèle se rapproche au plus d'un véritable pied de bovin et qu'il paraisse le plus réaliste possible aux yeux de ceux qui le manipulent. Pour autant comme nous l'avons vu tout au long de cette thèse, **l'anatomie d'un pied de bovin se révèle particulièrement complexe** et dans ses points les plus précis, présentent souvent des variabilités individuelles. Ainsi, **la fidélité anatomique parfaite n'est pas l'objectif de ce modèle** qui serait beaucoup plus complexe et coûteux.

Ces modèles sont les premiers illustrant la biomécanique du pied disponibles à VetAgro-Sup. En tant que 1^{ère} version, **elle peut être améliorée ou modifiée** en fonction du retour des enseignants et des étudiants.

La création d'un modèle physique de pied de bovin peut sembler étonnante à l'heure où les technologies de réalité virtuelle permettent de voir des objets complexes en trois dimensions à l'aide d'un équipement adapté. **L'avantage d'un modèle physique**, par rapport à un film qui pourrait représenter la cascade pathogénique d'événements aboutissant aux lésions mécaniques évoquées dans ce travail ou à un modèle virtuel, est sans aucun doute sa **manipulation** qui permet de **ressentir différentes densités de corne** ou **différents degrés d'enfoncement du pied dans la boîte cornée**. Un modèle 3D ou une vidéo pédagogique seraient cependant des **éléments complémentaires** précieux dans la compréhension de la biomécanique du pied. Le développement d'un **guide papier** pourrait être pertinente pour guider les étudiants dans les manipulations à effectuer une fois le modèle en main pour mettre en avant les éléments à observer et ainsi permettre un apprentissage en autonomie. Il n'a pas été réalisé ici par manque de temps.

A partir des acquis de ce 1^{er} modèle, il serait intéressant de réaliser des **modèles supplémentaires** qui illustrent d'autres aspects de la biomécanique du pied abordés dans cette thèse. Il pourrait s'agir d'un **modèle illustrant les mécanismes pathogéniques à l'origine des principales lésions podales** telles que :

- **Les ulcères de sole** : par une pression exagérée ou un enfoncement répété de P3 dans le pied, une partie de la corne solaire en regard du *processus extensorius* de P3 pourrait se détacher et laisser sortir le pododerme
- **Les bleimes circonscrites ou diffuse** : lors de l'appui du pied, la compression du tissu velouté entrainerait la collection d'un liquide entre le pododerme et la corne, simulant une hémorragie du pododerme, visible depuis l'extérieur à travers la corne solaire transparente, en mettant en exergue le décalage temporel entre l'apparition de la lésion et l'instant où elle devient visible en face solaire et justifiant le fait que le parage d'une bleime est inutile

- **La séparation de la ligne blanche, le relâchement de l'appareil suspenseur de P3 autour de la gestation, la rotation d'un onglon etc...**

Ainsi, il reste de **nombreuses possibilités de modèles pertinents à créer**. Avec le développement rapide de la réalité virtuelle apportant de **nouvelles possibilités intéressantes et inédites d'apprentissage** qui seront sûrement bénéfiques aux étudiants vétérinaires, la possibilité de pouvoir **manipuler, démonter et articuler un modèle palpable de pied** restera tout de même **pertinente et intéressante à développer**.

CONCLUSION

L'étude de l'anatomie et de la biomécanique du pied de bovin reflète une importance capitale dans la compréhension des lésions mécaniques à l'origine de boiteries chez les vaches laitières. La boîte cornée est un ensemble complexe de multiples composantes dont l'état actuel des connaissances montre qu'il s'agit d'un assemblage complexe de tissus kératinisés de propriétés différentes. L'étude de la biomécanique montre que la cinématique de la marche et la cinétique du pied pendant le mouvement ou la station prolongée debout sont des marqueurs très sensibles des changements de l'organisation interne du pied. De nombreuses recherches récentes se sont attachées à l'analyse des conséquences des changements de la conformation de l'appareil suspenseur et protecteur de la troisième phalange, avec comme objectif d'identifier les facteurs de risques principaux de l'apparition des boiteries, consécutives aux contraintes de l'élevage actuel. La conséquence la plus fréquente est une déformation de la boîte cornée qui modifie la démarche et les appuis de l'animal.

A ce titre, le parage fonctionnel, bien qu'imparfait, constitue un acte de correction de ces modifications. Bien compris, il doit permettre de rééquilibrer régulièrement le pied pour prévenir l'apparition des boiteries. Il est donc important que les futurs vétérinaires comprennent les attendus de cet acte en fonction du contexte d'élevage.

La réalisation d'un modèle de pied sain et déformé a été pensée dans cet objectif. L'apprentissage de la méthode de parage sur différents pieds synthétiques ou récupérés d'un abattoir en seront facilités. D'autres modèles sont à penser pour mieux illustrer encore la pathogénie des lésions mécaniques et pourraient venir compléter ce travail.

BIBLIOGRAPHIE

1. BARONE, R. *Anatomie comparée des mammifères domestiques. Tome 1, Osteologie*. . 5e édition rev.et mise à jour. Paris : Association Centrale d'entraide Vétérinaire, 2020.
2. LEACH, D. Recommended terminology for researchers in locomotion and biomechanics of quadrupedal animals. *Acta Anatomica*. [en ligne]. 1993. Vol. 146, n° 2-3, pp. 130-136. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://doi.org/10.1159/000147434>
3. BUDRAS, K. et al. *Bovine Anatomy: An Illustrated Text, Second Edition*. . 2ème édition. Allemagne : Schluetersche, 2011.
4. KÖNIG, H. E. et LIEBICH, H-G. (éd.). *Veterinary anatomy of domestic animals: textbook and colour atlas*. . 7ème édition. Stuttgart ; New York : Thieme, 2020.
5. NACAMBO, S. et al. Difference in Length of the Metacarpal and Metatarsal Condyles in Calves and the Correlation to Claw Size | IVIS. In : *13ème Symposium International et 5ème Conférence sur les Boiteries des Ruminants*. [en ligne]. Maribor, Slovénie : Borut Zemljič, 2004. pp. [inconnu]. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://www.ivis.org/library/iclr/lameness-ruminants-international-symposium-and-conference-slovenia-2004/difference>
6. PAULUS, N. et NUSS, K. Claw measures at defined sole thickness. In : *13ème Symposium International et 5ème Conférence sur les Boiteries des Ruminants*. [en ligne]. Maribor, Slovénie : Borut Zemljič, 2004. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://www.ivis.org/library/iclr/lameness-ruminants-international-symposium-and-conference-florida-2002/claw-measures>
7. MUGGLI, E., SAUTER-LOUIS, C., BRAUN, U. et NUSS, K. Length asymmetry of the bovine digits. *The Veterinary Journal*. [en ligne]. 2011. Vol. 188, n° 3, pp. 295-300. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2010.05.016>
8. BARONE, R. *Anatomie comparée des mammifères domestiques. Tome 2, Arthrologie et myologie*. . 4e édition. Paris : Vigot, 2010.
9. CRAMER, G. et SOLANO, L. Anatomy of the Distal Limb of a Cow - Musculoskeletal System. *MSD Veterinary Manual*. [en ligne]. MSD. 2023. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://www.msdtvetmanual.com/musculoskeletal-system/lameness-in-cattle/anatomy-of-the-distal-limb-of-a-cow>
10. TOUSSAINT RAVEN, E. *Soins des onglons des bovins : parage fonctionnel*. . 1ère édition. Alfred, Ontario : Ministère de l'agriculture et de l'alimentation de l'Ontario, 1992.
11. VERMUNT, J. J. et GREENOUGH, P. R. Structural characteristics of the bovine claw: Horn growth and wear, horn hardness and claw conformation. *British Veterinary Journal*. [en ligne]. 1995. Vol. 151, n° 2, pp. 157-180. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: [https://doi.org/10.1016/S0007-1935\(95\)80007-7](https://doi.org/10.1016/S0007-1935(95)80007-7)
12. SHEARER, J.K., PLUMMER, P.J. et SCHLEINING, J.A. Perspectives on the treatment of claw lesions in cattle. *Veterinary Medicine: Research and Reports*. [en ligne]. 2015. Vol. 6, pp. 273-292. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://doi.org/10.2147/VMRR.S62071>

13. NUSS, K. et PAULUS, N. Measurements of claw dimensions in cows before and after functional trimming: A post-mortem study. *The Veterinary Journal*. [en ligne]. 2006. Vol. 172, n° 2, pp. 284-292. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2005.04.031>
14. MAIERL, J., BOHMISCH, R., DICKOMEIT, M. et LIEBICH, H.-G. A Method of Biomechanical Testing the Suspensory Apparatus of the Third Phalanx in Cattle: a Technical Note. *Anatomia, Histologia, Embryologia: Journal of Veterinary Medicine Series C*. [en ligne]. 2002. Vol. 31, n° 6, pp. 321-325. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <http://doi.wiley.com/10.1046/j.1439-0264.2002.00421.x>
15. WINKLER, B. *Mechanical properties of hoof horn, sole haemorrhage and lameness in dairy cattle*. . PhD. Plymouth, Angleterre, Royaume-Uni : Université de Plymouth, 2005.
16. KARAMEEV, S., CUMSHEWA, N., VALITOV, K. et KARAMEVA, A. Biophysical qualities of the hoof horn and its influence on cows productive longevity. RUDOY, D. et IGNATEVA, S. (éd.), *E3S Web of Conferences*. [en ligne]. 2020. Vol. 175, pp. 03021. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017503021>
17. TOMLINSON, D. J., MÜLLING, C. H. et FAKLER, T. M. Invited Review: Formation of Keratins in the Bovine Claw: Roles of Hormones, Minerals, and Vitamins in Functional Claw Integrity. *Journal of Dairy Science*. [en ligne]. 2004. Vol. 87, n° 4, pp. 797-809. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(04\)73223-3](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(04)73223-3)
18. SHEARER, J. K. et VAN AMSTEL, S. R. *Manual of Foot Care in Cattle*. . 2ème édition. Fort Atkinson, Wisconsin : W.D. Hoard and Sons Company, 2013. Google-Books-ID: BvFeo6pFnXUC
19. MÜLLING, Ch. K. W., BRAGULLA, H. H., REESE, S., BUDRAS, K. -D. et STEINBERG, W. How Structures in Bovine Hoof Epidermis are Influenced by Nutritional Factors. *Anatomia, Histologia, Embryologia*. [en ligne]. 1999. Vol. 28, n° 2, pp. 103-108. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1046/j.1439-0264.1999.00180.x>
20. WANG, B., YANG, W., MCKITTRICK, J. et MEYERS, M.A. Keratin: Structure, mechanical properties, occurrence in biological organisms, and efforts at bioinspiration. *Progress in Materials Science*. [en ligne]. 2016. Vol. 76, pp. 229-318. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.06.001>
21. ASSIS, B.M. et al. Microtomographic Parameters and Nanoindentation of the Hoof of Girolando Cattle. *Anatomia, Histologia, Embryologia*. [en ligne]. 2017. Vol. 46, n° 5, pp. 456-463. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://doi.org/10.1111/ahe.12290>
22. FRANCK, A., COCQUYT, G., SIMOENS, P. et DE BELIE, N. Biomechanical Properties of Bovine Claw Horn. *Biosystems Engineering*. [en ligne]. 2006. Vol. 93, n° 4, pp. 459-467. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.01.007>
23. GREENOUGH, P. R. *Bovine laminitis and lameness: a hands on approach*. . 1ère édition. Edinburgh ; New York : Saunders/Elsevier, 2007.
24. KOFLER, J., KÜBBER, P. et HENNINGER, W. Ultrasonographic Imaging and Thickness Measurement of the Sole Horn and the Underlying Soft Tissue Layer in Bovine Claws. *The Veterinary Journal*. [en ligne]. 1999. Vol. 157, n° 3, pp. 322-331. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://doi.org/10.1053/tvj.1998.0315>

25. WANG, B., ZHOU, B., ZHANG, X. et WANG, B. Microstructure and mechanical properties of an alpha keratin bovine hoof wall. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. [en ligne]. 2020. Vol. 104. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2020.103689>
26. BAILLIE, C., SOUTHAM, C., BUXTON, A. et PAVAN, P. Structure and Properties of Bovine Hoof Horn. *Advanced Composites Letters*. [en ligne]. 2000. Vol. 9, n° 2. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://doi.org/10.1177/096369350000900202>
27. VAN AMSTEL, S. R., PALIN, F. L. et SHEARER, J. K. Measurement of the thickness of the corium and subcutaneous tissue of the hind claws of dairy cattle by ultrasound. *Veterinary Record*. [en ligne]. 2004. Vol. 155, n° 20, pp. 630-633. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://doi.org/10.1136/vr.155.20.630>
28. ZÖSCHER, M. *Mechanische Eigenschaften von Klauenhorn beim Rind : Elastizitätsmodul, Kugeleindruckhärte und Shore-D-Härte in Abhängigkeit vom Trockensubstanzgehalt und der Position der Klaue (Propriétés mécaniques de la corne de l'onglon des bovins : module d'élasticité, dureté à l'empreinte sphérique et dureté « Shore-D » en fonction de la teneur en matière sèche et de la position de l'onglon)*. . Thèse Docteur Vétérinaire. Vienne, Allemagne : Université vétérinaire, 2000.
29. VAN DER TOL, P. P. J., METZ, J. H. M., NOORDHUIZEN-STASSEN, E. N., BACK, W., BRAAM, C. R. et WEIJS, W. A. The Vertical Ground Reaction Force and the Pressure Distribution on the Claws of Dairy Cows While Walking on a Flat Substrate. *Journal of Dairy Science*. [en ligne]. 2003. Vol. 86, n° 9, pp. 2875-2883. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73884-3](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73884-3)
30. RÄBER, M., LISCHER, Ch. J., GEYER, H. et OSSENT, P. The bovine digital cushion – a descriptive anatomical study. *The Veterinary Journal*. [en ligne]. 2004. Vol. 167, n° 3, pp. 258-264. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: [https://doi.org/10.1016/S1090-0233\(03\)00053-4](https://doi.org/10.1016/S1090-0233(03)00053-4)
31. BICALHO, R. C., MACHADO, V. S. et CAIXETA, L. S. Lameness in dairy cattle: A debilitating disease or a disease of debilitated cattle? A cross-sectional study of lameness prevalence and thickness of the digital cushion. *Journal of Dairy Science*. [en ligne]. 2009. Vol. 92, n° 7, pp. 3175-3184. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1827>
32. RÄBER, M., SCHEEDER, M. R. L., OSSENT, P., LISCHER, Ch. J. et GEYER, H. The content and composition of lipids in the digital cushion of the bovine claw with respect to age and location – A preliminary report. *The Veterinary Journal*. [en ligne]. 2006. Vol. 172, n° 1, pp. 173-177. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2005.03.009>
33. LISCHER, Ch.J. et OSSENT, P. Pathogenesis of sole lesions attributed to laminitis in cattle. In : *12ème Symposium International sur les Boiteries des Ruminants*. [en ligne]. Orlando, Floride, Etats-Unis : Marriott World Center, 2002. pp. 466. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://www.ivos.org/library/iclr/lameness-ruminants-international-symposium-and-conference-florida-2002/pathogenesis-of>
34. LISCHER, C., OSSENT, P., RÄBER, M. et GEYER, H. Suspensory structures and supporting tissues of the third phalanx of cows and their relevance to the development of typical sole ulcers (Rusterholz ulcers). *The Veterinary record*. [en ligne]. 2003. Vol. 151, n° 23, pp. 694-698. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <http://dx.doi.org/10.1136/vr.151.23.694>

35. RASTANI, R. R., ANDREW, S. M., ZINN, S. A. et SNIFFEN, C. J. Body Composition and Estimated Tissue Energy Balance in Jersey and Holstein Cows During Early Lactation. *Journal of Dairy Science*. [en ligne]. 2001. Vol. 84, n° 5, pp. 1201-1209. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(01\)74581-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(01)74581-X)
36. HOEDEMAKER, M, PRANGE, D et GUNDELACH, Y. Body Condition Change Ante- and Postpartum, Health and Reproductive Performance in German Holstein Cows. *Reproduction in Domestic Animals*. [en ligne]. 2009. Vol. 44, n° 2, pp. 167-173. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1439-0531.2007.00992.x>
37. GEARHART, M. A. et al. Relationship of changes in condition score to cow health in Holsteins. *Journal of Dairy Science*. [en ligne]. 1990. Vol. 73, n° 11, pp. 3132-3140. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: [https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(90\)79002-9](https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(90)79002-9)
38. MÜLLING, C. K.W. Theories on the pathogenesis of white line disease - an anatomical perspective. In : *12ème Symposium International sur les Boiteries des Ruminants*. [en ligne]. Orlando, Floride, Etats-Unis : Marriott World Center, 2002. pp. 466. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://www.ivis.org/library/iclr/lameness-ruminants-international-symposium-and-conference-florida-2002/theories-on-pathogenesis-of-white-line-disease-an-anatomical-perspective>
39. WESTERFELD, I. et al. Suspensory apparatus of the distal phalanx (Ph III) in the bovine hoof. In : *11ème Symposium International et 3ème Conférence sur les Boiteries des Ruminants*. [en ligne]. Parme, Italie : Aula Magna of the University, 2000. pp. 374. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://www.ruminantia.it/wp-content/uploads/2020/08/LAMENESS-IN-RUMINANTS-INTERNATIONAL-SYMPOSIUM-AND-CONFERENCE-2019.pdf>
40. UNIVERSITÉ DE ZURICH. e-hoof.com. [en ligne]. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://e-hoof.com/glossary/appareil-suspenseur-de-la-troisieme-phalange>
41. KNOTT, L., TARLTON, J. F., CRAFT, H. et WEBSTER, A. J. F. Effects of housing, parturition and diet change on the biochemistry and biomechanics of the support structures of the hoof of dairy heifers. *The Veterinary Journal*. [en ligne]. 2007. Vol. 174, n° 2, pp. 277-287. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2006.09.007>
42. HARGIS, A.M. et MYERS, S. The Integument. *Pathologic Basis of Veterinary Disease*. [en ligne]. 2017. pp. 1009- 1146.e1. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7895312/>
43. VERMUNT, J. J. et LEACH, D. H. A macroscopic study of the vascular system of the bovine hind limb claw. *New Zealand Veterinary Journal*. [en ligne]. 1992. Vol. 40, n° 4, pp. 139-145. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16031679/>
44. BARONE, R. *Anatomie comparée des mammifères domestiques. Tome 5. Angiologie*. . 2e édition. Paris : Vigot, 2021.
45. BARONE, R. et SIMOENS, P. *Anatomie comparée des mammifères domestiques. Tome 7. Neurologie II. Système nerveux périphérique, glandes endocrines, esthésiologie*. . 2e édition. Paris : Vigot, 2010.
46. FREITAS, S.L.R. et al. Angiographie des doigts de jeunes bovins avant et après induction d'une acidose ruminale. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*. [en ligne]. 2018. Vol. 70, n° 3, pp. 749-757. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse:

http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-09352018000300749&lng=pt&tlng=pt

47. VERMUNT, J. J. et LEACH, D. H. A scanning electron microscopic study of the vascular system of the bovine hind limb claw. *New Zealand Veterinary Journal*. [en ligne]. 1992. Vol. 40, n° 4, pp. 146-154. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16031680/>
48. OSSENT, P. et LISCHER, C. Bovine laminitis: the lesions and their pathogenesis. *In Practice*. [en ligne]. 1998. Vol. 20, n° 8, pp. 415-427. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1136/inpract.20.8.415>
49. SHEARER, J. K. et VAN AMSTEL, S. R. Functional and Corrective Claw Trimming. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*. [en ligne]. 2001. Vol. 17, n° 1, pp. 53-72. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: [https://doi.org/10.1016/S0749-0720\(15\)30054-2](https://doi.org/10.1016/S0749-0720(15)30054-2)
50. BORDERAS, T. F., PAWLUCZUK, B., DE PASSILLÉ, A. M. et RUSHEN, J. Claw Hardness of Dairy Cows: Relationship to Water Content and Claw Lesions. *Journal of Dairy Science*. [en ligne]. 1 juillet 2004. Vol. 87, n° 7, pp. 2085-2093. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(04\)70026-0](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(04)70026-0)
51. HIGUCHI, H. Effects of biotin supplementation on serum biotin levels and physical properties of samples of solar horn of Holstein cows. *Canadian Journal of Veterinary Research*. [en ligne]. 2004. Vol. 68, n° 2, pp. 93-97. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1142151/>
52. BAGGOTT, D. G., BUNCH, K. J. et GILL, K. R. Variations in some inorganic components and physical properties of claw keratin associated with claw disease in the British Friesian cow. *British Veterinary Journal*. [en ligne]. 1988. Vol. 144, n° 6, pp. 534-542. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: [https://doi.org/10.1016/0007-1935\(88\)90023-1](https://doi.org/10.1016/0007-1935(88)90023-1)
53. CNRTL. Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales. [en ligne]. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://www.cnrtl.fr/definition/biom%C3%A9canique>
54. HALL, S. J. *Basic biomechanics*. . 9ème édition. New York, NY : McGraw-Hill, 2021.
55. ALSAOD, M., LUTERNAUER, M., HAUSEGGER, T., KREDEL, R. et STEINER, A. The cow pedogram - Analysis of gait cycle variables allows the detection of lameness and foot pathologies. *Journal of Dairy Science*. [en ligne]. 2017. Vol. 100, n° 2, pp. 1417-1426. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11678>
56. FLOWER, F. C., SANDERSON, D. J. et WEARY, D. M. Hoof Pathologies Influence Kinematic Measures of Dairy Cow Gait. *Journal of Dairy Science*. [en ligne]. 2005. Vol. 88, n° 9, pp. 3166-3173. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(05\)73000-9](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(05)73000-9)
57. O'LEARY, N. W., BYRNE, D. T., O'CONNOR, A. H. et SHALLOO, L. Invited review : Cattle lameness detection with accelerometers. *Journal of Dairy Science*. [en ligne]. 2020. Vol. 103, n° 5, pp. 3895-3911. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: [https://www.journalofdairyscience.org/article/S0022-0302\(20\)30141-7/fulltext](https://www.journalofdairyscience.org/article/S0022-0302(20)30141-7/fulltext)

58. SCHMID, T., WEISHAUPT, M. A., MEYER, S. W., WALDERN, N., VON PEINEN, K. et NUSS, K. High-speed cinematographic evaluation of claw-ground contact pattern of lactating cows. *The Veterinary Journal*. [en ligne]. 2009. Vol. 181, n° 2, pp. 151-157. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2008.02.019>
59. HERLIN, A. H. et DREVEMO, S. Investigating locomotion of dairy cows by use of high speed cinematography. *Equine Veterinary Journal*. [en ligne]. 1997. Vol. 29, n° S23, pp. 106-109. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.2042-3306.1997.tb05066.x>
60. CARVALHO, V. et al. Dairy Cattle Linear and Angular Kinematics during the Stance Phase. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*. [en ligne]. 2007. Vol. 9. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://hdl.handle.net/1813/10614>
61. PHILLIPS, C. J. C. et MORRIS, I. D. The Locomotion of Dairy Cows on Concrete Floors That are Dry, Wet, or Covered with a Slurry of Excreta. *Journal of Dairy Science*. [en ligne]. 2000. Vol. 83, n° 8, pp. 1767-1772. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(00\)75047-8](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(00)75047-8)
62. TIJSSEN, M. et al. Kinematic gait characteristics of straight line walk in clinically sound dairy cows. *PLOS ONE*. [en ligne]. 2021. Vol. 16, n° 7, pp. e0253479. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0253479>
63. MEYER, S. W., WEISHAUPT, M. A. et NUSS, K. A. Gait Pattern of Heifers Before and After Claw Trimming: A High-Speed Cinematographic Study on a Treadmill. *Journal of Dairy Science*. [en ligne]. 2007. Vol. 90, n° 2, pp. 670-676. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(07\)71549-7](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(07)71549-7)
64. PLUK, A., BAHR, C., POURSAHERI, A., MAERTENS, W., VAN NUFFEL, A. et BERCKMANS, D. Automatic measurement of touch and release angles of the fetlock joint for lameness detection in dairy cattle using vision techniques. *Journal of Dairy Science*. [en ligne]. 2012. Vol. 95, n° 4, pp. 1738-1748. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://doi.org/10.3168/jds.2011-4547>
65. CNIEL, SCHILLIGER, D. et NUSS, K. Mécanique du pied (d'après Principes du parage des onglons des bovins - en tenant compte de l'anatomie et de la biomécanique), Zürich: Clinique des ruminants, Vetsuisse faculté, Université de Zurich (2012). [en ligne]. 2012. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://www.youtube.com/watch?v=XqmbQdJm3qQ>
66. HUTH, C., RUSSKE, A., ALSLEBEN, B., HAMANN, H. et DISTL, O. Body and claw measurements and pressure distribution under the claws in calves of different cattle breeds. *Berliner Und Munchener Tierarztliche Wochenschrift*. [en ligne]. 2004. Vol. 117, n° 7-8, pp. 316-326. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15298060/>
67. ALSAOD, M., BUCHER, E., FEIERABEND, M., HAERDI-LANDERER, M-C. et STEINER, A. Detection and localisation of unilateral hindlimb pathologies in cattle using the cow pedogram. *Veterinary Record*. [en ligne]. 2019. Vol. 184, n° 10, pp. 318-318. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1136/vr.105014>
68. MAERTENS, W. et al. Development of a real time cow gait tracking and analysing tool to assess lameness using a pressure sensitive walkway: The GAITWISE system. *Biosystems Engineering*.

[en ligne]. 2011. Vol. 110, n° 1, pp. 29-39. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.06.003>

69. VIAZZI, S. et al. Analysis of individual classification of lameness using automatic measurement of back posture in dairy cattle. *Journal of Dairy Science*. [en ligne]. 2013. Vol. 96, n° 1, pp. 257-266. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://doi.org/10.3168/jds.2012-5806>

70. MOTTRAM, T. Animal board invited review : precision livestock farming for dairy cows with a focus on oestrus detection. *Animal*. [en ligne]. 2016. Vol. 10, n° 10, pp. 1575-1584. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1751731115002517>

71. ALSAOD, M., FADUL, M. et STEINER, A. Automatic lameness detection in cattle. *The Veterinary Journal*. [en ligne]. 2019. Vol. 246, pp. 35-44. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2019.01.005>

72. CHANNON, A. J., WALKER, A. M., PFAU, T., SHELDON, I. M. et WILSON, A. M. Variability of Manson and Leaver locomotion scores assigned to dairy cows by different observers. *Veterinary Record*. [en ligne]. 2009. Vol. 164, n° 13, pp. 388-392. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://doi.org/10.1136/vr.164.13.388>

73. OUWELTJES, W., GUSSEKLOO, S. W. S., SPOOR, C. W. et VAN LEEUWEN, J. L. A new technique using roentgen stereophotogrammetry to measure changes in the spatial conformation of bovine hind claws in response to external loads. *The Veterinary Journal*. [en ligne]. 2016. Vol. 208, pp. 81-86. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2015.07.010>

74. WINTER, D. A. *Biomechanics and motor control of human movement*. . 4ème édition. Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2009.

75. VAN DER TOL, P. P. J., METZ, J. H. M., NOORDHUIZEN-STASSEN, E. N., BACK, W., BRAAM, C. R. et WEIJS, W. A. Frictional Forces Required for Unrestrained Locomotion in Dairy Cattle. *Journal of Dairy Science*. [en ligne]. 2005. Vol. 88, n° 2, pp. 615-624. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(05\)72725-9](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(05)72725-9)

76. RAJAPAKSHA, E. et TUCKER, C.B. How do cattle respond to sloped floors? An investigation using behavior and electromyograms. *Journal of Dairy Science*. [en ligne]. 2014. Vol. 97, n° 5, pp. 2808-2815. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7435>

77. OUWELTJES, W., SPOOR, C. W., VAN LEEUWEN, J. L. et GUSSEKLOO, S. W. S. Spatial distribution of load induced soft-tissue strain in cattle claws. *The Veterinary Journal*. [en ligne]. 2019. Vol. 248, pp. 28-36. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2019.03.007>

78. TARLTON, J. F., HOLAH, D. E., EVANS, K. M., JONES, S., PEARSON, G. R. et WEBSTER, A. J. F. Biomechanical and Histopathological Changes in the Support Structures of Bovine Hooves around the Time of First Calving. *The Veterinary Journal*. [en ligne]. 2002. Vol. 163, n° 2, pp. 196-204. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://doi.org/10.1053/tvj.2001.0651>

79. VAN DER TOL, P. P. J., METZ, J. H. M., NOORDHUIZEN-STASSEN, E. N., BACK, W., BRAAM, C. R. et WEIJS, W. A. The Pressure Distribution Under the Bovine Claw During Square Standing on a Flat Substrate. *Journal of Dairy Science*. [en ligne]. 2002. Vol. 85, n° 6, pp. 1476-1481.

[Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(02\)74216-1](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(02)74216-1)

80. NUSS, K., MÜLLER, J. et WIESTNER, T. Effects of induced weight shift in the hind limbs on claw loads in dairy cows. *Journal of Dairy Science*. [en ligne]. 2019. Vol. 102, n° 7, pp. 6431-6441. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://doi.org/10.3168/jds.2018-15539>
81. FREITAS, S. M. S. F., WIECZOREK, S. A., MARCHETTI, P. H. et DUARTE, M. Age-related changes in human postural control of prolonged standing. *Gait & Posture*. [en ligne]. 2005. Vol. 22, n° 4, pp. 322-330. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2004.11.001>
82. ALSLEBEN, B. et al. Messung der Druckverteilung unter den Klauen bei Rindern der Rasse Deutsche Holsteins in den ersten zwei Lebensjahren (Mesure de la répartition de la pression sous les sabots des bovins de race Holstein allemande au cours des deux premières années de vie). *Le Vétérinaire Pratique*. [en ligne]. 2003. Vol. 9, n° 3, pp. 232-240. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://www.vetline.de/messung-der-druckverteilung-unter-den-klauen-bei-rindern-der-rasse-deutsche-holsteins-in-den-ersten>
83. BERGSTEN, C. Causes, Risk Factors, and Prevention of Laminitis and Related Claw Lesions. *Acta Veterinaria Scandinavica*. [en ligne]. 2003. Vol. 44, n° 1, pp. S157. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://doi.org/10.1186/1751-0147-44-S1-S157>
84. SPRECHER, D. J., HOSTETLER, D. E. et KANEENE, J. B. A lameness scoring system that uses posture and gait to predict dairy cattle reproductive performance. *Theriogenology*. [en ligne]. 1007. Vol. 47, n° 6, pp. 1179-1187. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: [https://doi.org/10.1016/S0093-691X\(97\)00098-8](https://doi.org/10.1016/S0093-691X(97)00098-8)
85. WINCKLER, C. et WILLEN, S. The Reliability and Repeatability of a Lameness Scoring System for Use as an Indicator of Welfare in Dairy Cattle. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section A — Animal Science*. [en ligne]. 2001. Vol. 51, n° sup030, pp. 103-107. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://doi.org/10.1080/090647001316923162>
86. ALSAOD, M., NIEDERHAUSER, J. J., BEER, G., ZEHNER, N., SCHUEPBACH-REGULA, G. et STEINER, A. Development and validation of a novel pedometer algorithm to quantify extended characteristics of the locomotor behavior of dairy cows. *Journal of Dairy Science*. [en ligne]. 2015. Vol. 98, n° 9, pp. 6236-6242. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://doi.org/10.3168/jds.2015-9657>
87. THOMSEN, P. T., MUNKSGAARD, L. et TØGERSEN, F. A. Evaluation of a Lameness Scoring System for Dairy Cows. *Journal of Dairy Science*. [en ligne]. 2008. Vol. 91, n° 1, pp. 119-126. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://doi.org/10.3168/jds.2007-0496>
88. BEGGS, D. S., JONGMAN, E. C., HEMSWORTH, P. E. et FISHER, A. D. Implications of prolonged milking time on time budgets and lying behavior of cows in large pasture-based dairy herds. *Journal of Dairy Science*. [en ligne]. 2018. Vol. 101, n° 11, pp. 10391-10397. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7435>
89. TUCKER, C. B., JENSEN, M. B., DE PASSILLÉ, A. M., HÄNNINEN, L. et RUSHEN, J. Invited review: Lying time and the welfare of dairy cows. *Journal of Dairy Science*. [en ligne]. 2021. Vol. 104, n° 1, pp. 20-46. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://doi.org/10.3168/jds.2019-18074>

90. LEONARD, F. C., O'CONNELL, J. et O'FARRELL, K. Effect of different housing conditions on behaviour and foot lesions in Friesian heifers. *The Veterinary Record*. [en ligne]. 1994. Vol. 134, n° 19, pp. 490-494. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/8073591/>
91. DE BELIE, N. et ROMBAUT, E. Characterisation of Claw–floor Contact Pressures for Standing Cattle and the Dependency on Concrete Roughness. *Biosystems Engineering*. [en ligne]. 1 juillet 2003. Vol. 85, n° 3, pp. 339-346. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: [https://doi.org/10.1016/S1537-5110\(03\)00064-3](https://doi.org/10.1016/S1537-5110(03)00064-3)
92. PHILLIPS, C. J. C. et MORRIS, I. D. The Locomotion of Dairy Cows on Floor Surfaces with Different Frictional Properties. *Journal of Dairy Science*. [en ligne]. 2001. Vol. 84, n° 3, pp. 623-628. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(01\)74517-1](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(01)74517-1)
93. ALSAAOD, M., HUBER, S., BEER, G., KOHLER, P., SCHÜPBACH-REGULA, G. et STEINER, A. Locomotion characteristics of dairy cows walking on pasture and the effect of artificial flooring systems on locomotion comfort. *Journal of Dairy Science*. [en ligne]. 2017. Vol. 100, n° 10, pp. 8330-8337. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://doi.org/10.3168/jds.2017-12760>
94. TRANTER, W.P. et MORRIS, R.S. Hoof growth and wear in pasture-fed dairy cattle. *New Zealand Veterinary Journal*. [en ligne]. 1992. Vol. 40, n° 3, pp. 89-96. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://doi.org/10.1080/00480169.1992.35707>
95. COOK, N. B., BENNETT, T. B. et NORDLUND, K. V. Effect of Free Stall Surface on Daily Activity Patterns in Dairy Cows with Relevance to Lameness Prevalence. *Journal of Dairy Science*. [en ligne]. 2004. Vol. 87, n° 9, pp. 2912-2922. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(04\)73422-0](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(04)73422-0)
96. NUSS, K. et al. Pressure distribution of claws of lactating cows standing on different types of flooring. In : *18ème Symposium International et 10ème Conférence sur les Boiteries des Ruminants*. [en ligne]. Valdivia, Chili : Université Austral du Chili, Faculté de Sciences Vétérinaires, 2015. pp. 185. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://www.ivis.org/library/iclr/lameness-ruminants-international-symposium-and-conference-chile-2015/pressure>
97. PLATZ, S., AHRENS, F., BENDEL, J., MEYER, H. H. D. et ERHARD, M. H. What Happens with Cow Behavior When Replacing Concrete Slatted Floor by Rubber Coating: A Case Study. *Journal of Dairy Science*. [en ligne]. 2008. Vol. 91, n° 3, pp. 999-1004. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://doi.org/10.3168/jds.2007-0584>
98. PLATZ, S., AHRENS, F., BENDEL, J., MEYER, H. et ERHARD, M. H. Rank correlated use of soft flooring by dairy cattle. *Animal Welfare*. [en ligne]. 2007. Vol. 16, n° 2, pp. 255-257. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://www.cambridge.org/core/journals/animal-welfare/article/abs/rank-correlated-use-of-soft-flooring-by-dairy-cattle/F70BA1645C48E0E77C2F484FDB22F5AC>
99. VANEGAS, J., OVERTON, M., BERRY, S. L. et SISCHO, W. M. Effect of Rubber Flooring on Claw Health in Lactating Dairy Cows Housed in Free-Stall Barns. *Journal of Dairy Science*. [en ligne]. 1 novembre 2006. Vol. 89, n° 11, pp. 4251-4258. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72471-7](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72471-7)

100. HERNANDEZ-MENDO, O., VON KEYSERLINGK, M. A. G., VEIRA, D. M. et WEARY, D. M. Effects of Pasture on Lameness in Dairy Cows. *Journal of Dairy Science*. [en ligne]. 2007. Vol. 90, n° 3, pp. 1209-1214. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(07\)71608-9](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(07)71608-9)
101. MANSKE, T., HULTGREN, J. et BERGSTEN, C. The effect of claw trimming on the hoof health of Swedish dairy cattle. *Preventive Veterinary Medicine*. [en ligne]. 2002. Vol. 54, n° 2, pp. 113-129. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: [https://doi.org/10.1016/S0167-5877\(02\)00020-X](https://doi.org/10.1016/S0167-5877(02)00020-X)
102. DELACROIX, M. et PRODHOMME, J. Boiteries des bovins - Prendre soin des pieds des vaches au quotidien ! [en ligne]. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://boiteries-des-bovins.fr/bleime-diffuse/>
103. MOHAMADNIA, A. et MOHAMADPOUR, A. Anatomic Determination of the Sole Thickness in Untrimmed Cattle. In : *13ème Symposium International et 5ème Conférence sur les Boiteries des Ruminants*. [en ligne]. Maribor, Slovénie : Borut Zemljič, 2004. pp. [inconnu]. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://www.ivis.org/library/iclr/lameness-ruminants-international-symposium-and-conference-slovenia-2004/anatomic>
104. VAN DER TOL, P. P. J. et al. The Effect of Preventive Trimming on Weight Bearing and Force Balance on the Claws of Dairy Cattle. *Journal of Dairy Science*. [en ligne]. 2004. Vol. 87, n° 6, pp. 1732-1738. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(04\)73327-5](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(04)73327-5)
105. ALSAOD, M. et al. A field trial of infrared thermography as a non-invasive diagnostic tool for early detection of digital dermatitis in dairy cows. *The Veterinary Journal*. [en ligne]. 2014. Vol. 199, n° 2, pp. 281-285. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2013.11.028>
106. ALSAOD, M., SYRING, C., LUTERNAUER, M., DOHERR, M. G. et STEINER, A. Effect of routine claw trimming on claw temperature in dairy cows measured by infrared thermography. *Journal of Dairy Science*. [en ligne]. 2015. Vol. 98, n° 4, pp. 2381-2388. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://doi.org/10.3168/jds.2014-8594>
107. CARVALHO, V. et al. Effects of Trimming on Dairy Cattle Hoof Weight Bearing Surfaces and Pressure Distributions. *Brazilian Journal of Veterinary Research and Animal Science*. [en ligne]. 2006. Vol. 43, n° 4, pp. 518-525. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: https://www.researchgate.net/publication/235891394_Effects_of_Trimming_on_Dairy_Cattle_Hoof_Weight_Bearing_Surfaces_and_Pressure_Distributions
108. BLOWEY, R. W. *Cattle Lameness and Hoofcare: An Illustrated Guide*. . 3ème édition. Portland : 5m Books Ltd, 2020.
109. OUWELTJES, W., HOLZHAUER, M., VAN DER TOL, P. P. J. et VAN DER WERF, J. Effects of two trimming methods of dairy cattle on concrete or rubber-covered slatted floors. *Journal of Dairy Science*. [en ligne]. 2009. Vol. 92, n° 3, pp. 960-971. [Consulté le 1 janvier 2024]. Disponible à l'adresse: <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1559>

BIOMÉCANIQUE DU PIED DE BOVIN : ÉTAT DES CONNAISSANCES EN VUE DE LA RÉALISATION DE MODÈLES DESTINÉS A L'ENSEIGNEMENT

Auteur

ASTAROTTA Luca

Résumé

En élevage bovin laitier, les boiteries podales constituent une dominante pathologique majeure avec des effets majeurs sur la santé, la productivité et le bien-être des bovins laitiers. La connaissance des structures du pied, internes au sabot, dont la synthèse est fine et complexe, est un préalable à la compréhension des conséquences que les contraintes d'élevage intensif en bâtiment peuvent avoir sur les animaux. Elle permet de comprendre le schéma pathogénique des lésions podales mécaniques afin de développer une approche préventive. L'étude de la biomécanique du pied et de la marche des bovins se décompose en cinématique et cinétique, dont le second explique les modifications consécutives aux contraintes et aux lésions et ce de façon précoce. Le parage fonctionnel est la première étape de prévention du développement de boiteries graves : il constitue donc un apprentissage indispensable pour les vétérinaires qui se destinent à une pratique rurale. Cette synthèse se concrétise par l'élaboration d'un modèle synthétique pédagogique destiné à l'enseignement à VetAgro-Sup donnant accès aux éléments structuraux et fonctionnels clés dans la compréhension de la biomécanique du pied.

Mots-clés

Bovin, Pied, Apprentissage, Biomécanique, Support pédagogique

Jury

Président du jury : Pr **COCHAT Pierre**

Directeur de thèse : Pr **ARCANGIOLI Marie-Anne**

2ème assesseur : Dr **ALVES DE OLIVEIRA Laurent**