



**HAL**  
open science

# Imagerie scanner du boulet du cheval : application à l'enseignement d'anatomie

Valentine Feugère

► **To cite this version:**

Valentine Feugère. Imagerie scanner du boulet du cheval : application à l'enseignement d'anatomie. Médecine vétérinaire et santé animale. 2022. dumas-03970859

**HAL Id: dumas-03970859**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03970859v1>**

Submitted on 2 Feb 2023

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

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

---

Année 2022

**IMAGERIE SCANNER DU BOULET DU CHEVAL :  
APPLICATION À L'ENSEIGNEMENT D'ANATOMIE**

**THÈSE**

pour obtenir le diplôme d'État de

**DOCTEUR VÉTÉRINAIRE**

présentée et soutenue publiquement devant

la Faculté de Médecine de Créteil (UPEC)

le 22 Août 2022

par

**Valentine, Liliane, Gabrielle FEUGÈRE**

sous la direction de

**Fabrice AUDIGIÉ**

**JURY**

<b>Présidente du jury :</b>	<b>Mme Céline ROBERT</b>	Professeur à l'EnvA
<b>Directeur de thèse :</b>	<b>M. Fabrice AUDIGIÉ</b>	Professeur à l'EnvA
<b>Examineur 1 :</b>	<b>M. Henry CHATEAU</b>	Professeur à l'EnvA



**Liste des enseignants intervenant dans l'encadrement des thèses de Doctorat vétérinaire**



Version du 8 février 2022

**Liste des Professeurs et Maîtres de conférences titulaires de l'HDR**

M	Adjou	Karim	Professeur	DPASP
M	Audigié	Fabrice	Professeur	DEPEC
M	Bellier	Sylvain	Professeur	DSBP
M	Blaga	Radu	Maître de conférences HDR	DPASP
M	Blot	Stephane	Professeur	DEPEC
M	Boulouis	Henri-Jean	Professeur émérite	DSBP
Mme	Chahory	Sabine	Professeur	DEPEC
M	Chateau	Henry	Professeur	DSBP
Mme	Chetboul	Valerie	Professeur	DEPEC
Mme	Crevier-Denoix	Nathalie	Professeur	DSBP
M	Degueurce	Christophe	Professeur	DSBP
M	Denoix	Jean-Marie	Professeur	DEPEC
M	Desquilbet	Loïc	Professeur	DSBP
Mme	Dufour	Barbara	Professeur émérite	DPASP
M	Eloit	Marc	Professeur	DSBP
M	Fayolle	Pascal	Professeur émérite	DEPEC
M	Fédérighi	Michel	Professeur	DPASP
M	Fontbonne	Alain	Professeur	DEPEC
Mme	Gilbert	Caroline	Professeur	DSBP
M	Grandjean	Dominique	Professeur	DEPEC
Mme	Grimard-Ballif	Bénédicte	Professeur	DPASP
Mme	Haddad-Hoang Xuan	Nadia	Professeur	DPASP
M	Jouvion	Gregory	Professeur	DSBP
M	Kohlhauer	Matthias	Maître de conférences HDR	DSBP
Mme	Le Poder	Sophie	Professeur	DSBP
M	Manassero	Mathieu	Professeur	DEPEC
Mme	Maurey-Guénec	Christelle	Maître de conférences HDR	DEPEC
M	Millemann	Yves	Professeur	DPASP
M	Perrot	Sébastien	Maître de conférences HDR	DSBP
Mme	Pilot-Storck	Fanny	Professeur	DSBP
M	Ponter	Andrew	Professeur	DPASP
Mme	Rivière	Julie	Maître de conférences HDR	DPASP
Mme	Robert	Céline	Professeur	DSBP
M	Tiret	Laurent	Professeur	DSBP
M	Tissier	Renaud	Professeur	DSBP
M	Verwaerde	Patrick	Professeur	DEPEC
Mme	Viateau	Véronique	Professeur	DEPEC

**Liste des Maîtres de conférences et Ingénieurs de recherche DMV**

M	Arné	Pascal	Maître de conférences	DPASP
Mme	Barassin	Isabelle	Maître de conférences	DPASP
Mme	Benckekroun	Ghita	Maître de conférences	DEPEC
Mme	Bertoni	Lelia	Maître de conférences	DEPEC
M	Bolnot	Francois	Maître de conférences	DPASP
Mme	Canonne-Guibert	Morgane	Maître de conférences	DEPEC
Mme	Chevallier	Lucie	Maître de conférences	DSBP
Mme	Cochet-Faivre	Noëlle	Maître de conférences	DEPEC
Mme	Constant	Fabienne	Maître de conférences	DPASP
Mme	Cordonnier-Lefort	Nathalie	Maître de conférences	DSBP
Mme	Crepeaux	Guillemette	Maître de conférences	DSBP
Mme	De Paula Reis	Alline	Maître de conférences	DPASP
Mme	Decambon	Adeline	Maître de conférences	DEPEC
M	Delsart	Maxime	Maître de conférences associé	DPASP
M	Desbois	Christophe	Maître de conférences	DEPEC
M	Deshuillers	Pierre	Maître de conférences	DSBP
M	Gauthier	Michel	Maître de conférences associé	DPASP
Mme	Guétin-Poirier	Valentine	Maître de conférences	DPASP
Mme	Jacquet	Sandrine	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
Mme	Lagrée	Anne-Claire	Maître de conférences	DSBP
Mme	Le Roux	Delphine	Maître de conférences	DSBP
Mme	Legrand	Chantal	Maître de conférences associé	DSBP
Mme	Marignac	Genevieve	Maître de conférences	DSBP
M	Mauffré	Vincent	Maître de conférences	DPASP
Mme	Mtimet	Narjès	Maître de conférences	DPASP
Mme	Mespoulhès-Rivière	Céline	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
M	Mortier	Jérémy	Maître de conférences associé	DEPEC
M	Nudelmann	Nicolas	Maître de conférences	DEPEC
M	Pignon	Charly	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
M	Polack	Bruno	Maître de conférences	DSBP
Mme	Ravary-Plumioën	Bérangère	Maître de conférences	DPASP
M	Reyes-Gomez	Edouard	Maître de conférences	DSBP
Mme	Risco-Castillo	Véronica	Maître de conférences	DSBP
Mme	Rose	Hélène	Maître de conférences associé	DSBP



# Remerciements

**A Monsieur Fabrice AUDIGIÉ**, professeur à l'EnvA et directeur de ma thèse, je vous suis grandement reconnaissante de m'avoir attribué cette thèse plus qu'intéressante et utile aux étudiants. Je vous remercie pour le temps que vous avez consacré à ce projet et pour votre investissement.

**A Madame Céline ROBERT**, professeure à l'EnvA et présidente du jury de ma thèse, un grand merci pour votre implication dans le jury de ma soutenance.

**A Monsieur Henry CHATEAU**, professeur à l'EnvA et examinateur de ma thèse, je vous remercie pour le temps et le travail consacrés à ma thèse.

**A mon camarade Camille CAPITAINÉ**, qui a participé à la réflexion et à la maturation de ma thèse, travaillant en miroir sur le jarret du cheval.

**A ma famille**, pour leur soutien permanent tout au long de mes études et l'amour que vous me portez.



# Table des matières

---

<b>Liste des figures</b> .....	<b>3</b>
<b>Liste des abréviations</b> .....	<b>5</b>
<b>Introduction</b> .....	<b>7</b>
<b>Première partie : Rappels et généralités</b> .....	<b>9</b>
1. Bases techniques de la tomodensitométrie .....	9
A. <i>Instrumentation</i> .....	9
a. Tube à rayons X.....	9
b. Collimateurs et filtration .....	10
c. Systèmes de détection.....	10
d. Anatomie du portique.....	10
B. <i>Interprétation des images</i> .....	11
a. Coefficient d'atténuation.....	11
b. Représentation des densités.....	12
C. <i>Qualité et traitement de l'image</i> .....	12
a. Résolution, bruit et exposition du patient .....	12
b. Filtres .....	13
c. Reconstruction multiplans .....	13
d. Reconstruction en trois dimensions (3D) .....	13
D. <i>Produit de contraste</i> .....	14
a. Intra-articulaire .....	14
b. Intravasculaire.....	14
2. Anatomie de la région du boulet.....	15
A. <i>Ostéologie</i> .....	15
a. Boulet du membre thoracique .....	16
b. Boulet du membre pelvien .....	18
B. <i>Arthrologie, moyens d'union et synoviale</i> .....	21
a. Métacarpe et phalange proximale .....	21
b. Métacarpe et os sésamoïdes proximaux.....	21
c. Phalange proximale et os sésamoïdes proximaux.....	21
d. Os sésamoïdes proximaux entre eux.....	21
e. Maintien de l'articulation entière.....	22
f. Synoviale articulaire .....	22
C. <i>Myologie</i> .....	25
a. Membre thoracique .....	25
b. Membre pelvien .....	29
D. <i>Bourses, gaines, et fascias</i> .....	31
E. <i>Angiologie</i> .....	33
a. Réseau artériel du membre thoracique .....	33
b. Réseau veineux du membre thoracique.....	35
c. Réseau artériel du membre pelvien .....	35
d. Réseau veineux du membre pelvien.....	37
F. <i>Neurologie</i> .....	39
a. Neurologie du membre thoracique .....	39
b. Neurologie du membre pelvien .....	39
<b>Deuxième partie : matériel et méthodes</b> .....	<b>41</b>
1. Instrumentation et acquisition des images .....	41
2. Traitement des images et annotations anatomiques.....	43
<b>Troisième partie : résultats : création d'un support pédagogique d'anatomie</b> .....	<b>45</b>
1. Le diaporama d'images tomodensitométriques annotées .....	45

A. <i>Ostéologie 3D</i> .....	46
B. <i>Filtre osseux</i> .....	48
a. Coupes frontales .....	48
b. Coupes sagittales .....	49
c. Coupes transversales .....	50
C. <i>Filtre tissus mous</i> .....	51
a. Coupes frontales .....	51
b. Coupes sagittales .....	52
c. Coupes transversales .....	52
D. <i>Techniques spéciales</i> .....	54
a. Injections intra-articulaires .....	54
b. Injections intravasculaires .....	55
2. Le contrôle de connaissances sous forme de quizz .....	56
<b>Quatrième partie : discussion sur les résultats et applications cliniques</b> .....	<b>59</b>
1. Analyse du travail effectué .....	59
a. Réalisation des images .....	59
b. Mise en place d'un contenu pédagogique sur la plateforme Eve et intérêt pédagogique .....	59
2. Application clinique de la tomodensitométrie du boulet du cheval .....	60
A. <i>Qualité de différenciation des formations anatomiques</i> .....	60
B. <i>Comparaison avec la radiographie</i> .....	60
C. <i>Comparaison avec l'IRM</i> .....	60
D. <i>Tomodensitométrie et affections ostéoarticulaires</i> .....	61
a. Tissus osseux et tissus cartilagineux .....	61
b. Tissus mous .....	64
<b>Conclusion</b> .....	<b>67</b>
<b>Liste des références bibliographiques</b> .....	<b>69</b>

# Liste des figures

---

Figure 1 : Tube à rayon X (CEA, 2014). .....	9
Figure 2 : Anatomie du portique des scanners de 3 <sup>ème</sup> et 4 <sup>ème</sup> générations (Contardi et al., 2019). .....	11
Figure 3 : Doigt du cheval, membre thoracique en vue latérale (Barone, 1986). .....	15
Figure 4 : Os métacarpiens II, III, IV, disjoints en vue palmaire (Barone, 1986). .....	16
Figure 5 : Phalange proximale et os sésamoïdes proximaux (Barone, 1986). .....	18
Figure 6 : Os du membre pelvien, vue latérale (Barone, 1986). .....	19
Figure 7 : Os métatarsiens gauches, vue latérale et vue plantaire (Barone, 1986). .....	20
Figure 8 : Ligaments sésamoïdiens de l'articulation métacarpo-phalangienne (Barone, 2000). .....	22
Figure 9 : Vue palmaire des différents moyens d'union de l'articulation du boulet thoracique (Barone, 2000). .....	23
Figure 10 : Synoviales tendineuses (en bleu) et articulaires (en rouge) du boulet d'un membre thoracique en vue latérale (Barone, 2000). .....	24
Figure 11 : Rapport entre les tendons et les autres formations anatomiques du boulet thoracique, coupe sagittale (Barone, 2000). .....	26
Figure 12 : Insertions proximales des muscles fléchisseurs du doigt, membre thoracique en vue médiale (Barone, 2000). .....	27
Figure 13 : Insertions distales et rapports des muscles fléchisseurs du doigt, membre thoracique (Barone, 2000). .....	28
Figure 14 : Muscles de la jambe et du pied, vue médiale (Barone, 2000). .....	30
Figure 15 : Gaine de la main du cheval, vue palmaire (Barone, 2000). .....	32
Figure 16 : Réseau artériel de la main du cheval, vue palmaire (Barone, 2011). .....	34
Figure 17 : Artères du pied du cheval, vue médiale (Barone, 2011). .....	36
Figure 18 : Veines du pied du cheval (Barone, 2011). .....	38
Figure 19 : Rapports anatomiques des nerfs du membre thoracique, vue médiale (Barone, 2011). .....	40
Figure 20 : Salle du scanner au CIRALE et sa table pour chevaux. ....	41
Figure 21 : Table du scanner du CIRALE avec un cheval pour un examen d'imagerie de l'antérieur gauche. ....	42
Figure 22 : Exemple d'une des diapositives légendées de l'ostéologie du boulet en 3D, vue frontale. ....	46
Figure 23 : Exemple d'une des diapositives légendées de l'ostéologie du boulet en 3D, vue oblique dorsolatérale. ....	46
Figure 24 : Exemple d'une des diapositives légendées de l'ostéologie du boulet en 3D, vue dorsale après suppression de l'os métacarpien III. ....	47
Figure 25 : Exemple d'une des diapositives légendées d'une coupe frontale tissus osseux, tiers moyen du condyle métacarpien. ....	48
Figure 26 : Exemple d'une des diapositives légendées d'une coupe frontale tissus osseux en région des os sésamoïdes proximaux. ....	49
Figure 27 : Exemple d'une des diapositives légendées d'une coupe parasagittale tissus osseux. ....	49
Figure 28 : Exemple d'une des diapositives légendées d'une coupe transversale tissus osseux en région pharyngale. ....	50
Figure 29 : Exemple d'une des diapositives légendées d'une coupe transversale tissus osseux en région de l'articulation métacarpo-phalangienne. ....	50
Figure 30 : Exemple d'une des diapositives légendées d'une coupe frontale tissus mous en région palmaire du condyle métacarpien. ....	51
Figure 31 : Exemple d'une des diapositives légendées d'une coupe frontale tissus mous en région des os sésamoïdes proximaux. ....	51
Figure 32 : Exemple d'une des diapositives légendées en coupe parasagittale filtre tissus mous. ....	52
Figure 33 : Exemple d'une des diapositives légendées d'une coupe transversale tissus mous en région diaphysaire. ....	52
Figure 34 : Exemple d'une des diapositives légendées d'une coupe transversale tissus mous en région du condyle métacarpien. ....	53

<i>Figure 35 : Exemple d'une des diapositives légendées d'une modélisation 3D en vue oblique palmaro-dorsale, après injection intra-articulaire (10 ml de produit de contraste).....</i>	<i>54</i>
<i>Figure 36 : Exemple d'une des diapositives légendées d'une coupe sagittale après injection de produit de contraste en intra-articulaire (30 ml de produit de contraste). ....</i>	<i>54</i>
<i>Figure 37 : Exemple d'une des diapositives légendées illustrant les vaisseaux sanguins injectés (2 ml/s) en modélisation 3D. ....</i>	<i>55</i>
<i>Figure 38 : Exemple d'une des diapositives légendées illustrant les vaisseaux sanguins injectés (2 ml/s) en coupe transversale. ....</i>	<i>55</i>
<i>Figure 39 : Exemple d'une des questions du test de connaissances du tronc commun. ....</i>	<i>56</i>
<i>Figure 40 : Exemple d'une des questions du test de connaissances pour les A6 et internes. ....</i>	<i>57</i>
<i>Figure 41 : Ressources disponibles pour un étudiant se rendant sur la page Eve consacrée à la thèse (ici visualisées avec le mode édition de Eve). ....</i>	<i>57</i>
<i>Figure 42 : Images tomodensitométriques d'une fissure et de lésions sous-chondrales de la phalange proximale. (Saunders J., Bergman H., 2011). ....</i>	<i>62</i>
<i>Figure 43 : Images tomodensitométriques de fractures comminutives de la phalange proximale (Saunders J., Bergman H., 2011). ....</i>	<i>62</i>
<i>Figure 44 : Images tomodensitométriques de lésions ostéochondrales palmaro-distales du condyle métacarpien (Vanderperren K., Bergman H., 2011). ....</i>	<i>63</i>
<i>Figure 45 : Images tomodensitométriques d'ostéomyélite des os sésamoïdaux proximaux (Vanderperren K., Bergman H., 2011). ....</i>	<i>63</i>
<i>Figure 46 : Images micro-tomodensitométriques comparatives d'os sésamoïdaux fracturé et controlatéral en comparaison avec celui des chevaux contrôles (Cresswell E., Mcdonough N. et al., 2018). ....</i>	<i>64</i>
<i>Figure 47 : Images tomodensitométriques de desmite des ligaments sésamoïdiens distaux (Vanderperren K., Bergman H., 2011). ....</i>	<i>65</i>
<i>Figure 48 : Image tomodensitométrique illustrant une desmite du ligament suspenseur du boulet (Vanderperren K., Bergman H., 2011). ....</i>	<i>65</i>

# Liste des abréviations

---

3D : Trois Dimensions

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

ENVA : École Nationale Vétérinaire d'Alfort

IRM : Imagerie par Résonance Magnétique

MIP : Maximal Intensity Projection

MPR : Multi Planar Reconstruction

UC : Unité de Compétence

UH : Unité Hounsfield



# Introduction

---

Le boulet est une zone anatomique sujette à de nombreuses affections chez le cheval athlète. Cette région qui comprend l'articulation métacarpo/tarso-phalangienne est en effet soumise à des contraintes biomécaniques très importantes lors de l'entraînement, le saut ou la course. Les lésions peuvent être osseuses, articulaires, tendineuses ou ligamentaires.

L'imagerie médicale est essentielle pour diagnostiquer ces lésions et prévenir leur aggravation. De nos jours, la tomodensitométrie, plus communément appelée scanner, est l'examen le plus précis pour diagnostiquer certaines lésions osseuses du boulet et planifier les traitements de fractures complexes de cette région. Il s'avère que le scanner serait aussi très utile pour imager des lésions articulaires et des tissus mous du boulet.

Connaître l'anatomie de la région du boulet du cheval est primordial pour tout vétérinaire destiné à une pratique équine. L'intérêt de cette thèse est de présenter un atlas de coupes tomodensitométriques et d'images en trois dimensions d'un boulet de cheval sain, ainsi qu'un test de connaissances pour les étudiants afin qu'ils progressent dans leur connaissance de l'anatomie de cette région.

Pour cela, nous commencerons par présenter la technique d'imagerie tomodensitométrique, puis notre méthode d'acquisition d'images et le contenu pédagogique créé. Enfin, nous présenterons nos résultats et discuterons des applications cliniques de l'examen tomodensitométrique.



# Première partie : Rappels et généralités

## 1. Bases techniques de la tomodensitométrie

### A. Instrumentation

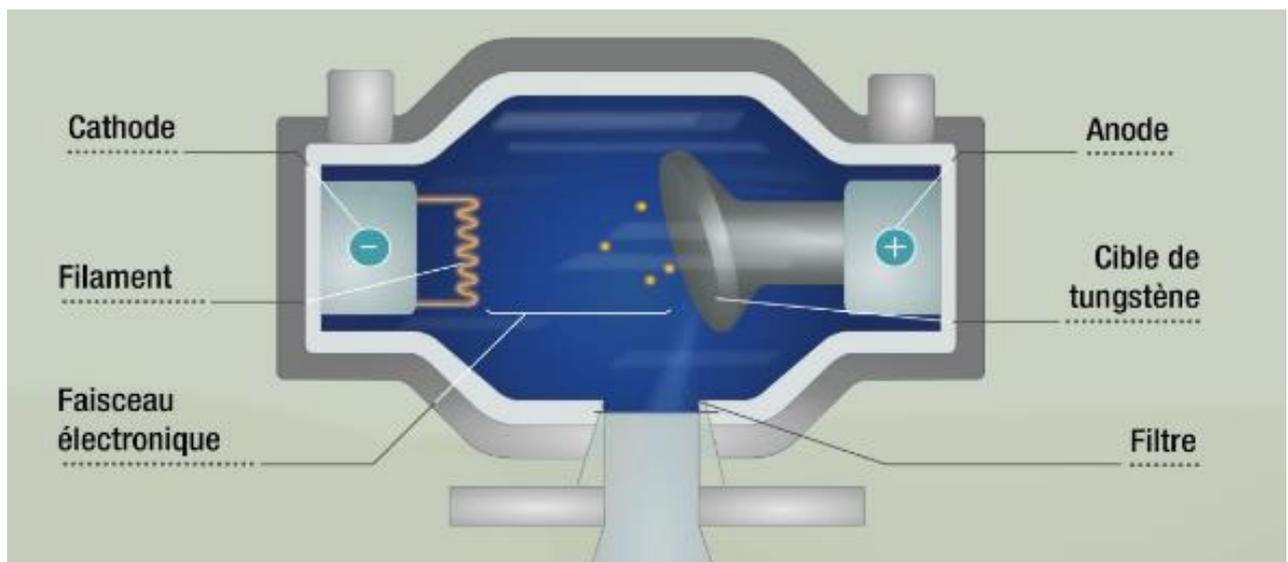
Un scanner ou tomodensitomètre est composé d'un générateur, d'un portique en forme d'anneau contenant le tube à rayons X et les détecteurs, d'une table pour le patient, de matériel informatique et d'une console opérateur. Le trou central du portique accueille le patient grâce à une table coulissante dont la hauteur est ajustable. On peut définir un plan x-y dans le plan de l'anneau du scanner dont l'axe x est horizontal et l'axe y vertical. Une troisième dimension z sera représentée selon l'orientation du patient. Le tube à rayons X tourne autour du patient et permet de reconstruire des coupes anatomiques (Saunders et Ohlerth, 2011).

#### a. Tube à rayons X

C'est un tube sous vide composé d'une cathode et d'une anode et produisant des rayons X. Comme le montre la figure 1, la cathode, un filament de tungstène, libère des électrons lorsqu'elle est soumise à un courant de quelques ampères.

Une source d'alimentation haute tension est connectée entre la cathode et l'anode pour accélérer la production d'électrons et ainsi créer un flux. Ce flux d'électrons vient percuter l'anode, un disque de tungstène, et environ 1 % de l'énergie cinétique produite est convertie en rayons X envoyés perpendiculairement au flux d'électrons. Le reste de l'énergie est converti en chaleur. Celle-ci pouvant monter jusqu'à 1500°C, différents éléments permettent le refroidissement de l'appareil, qui ne seront pas détaillés ici (Figure 1, Saunders et Ohlerth, 2011 ; CEA, 2014).

Figure 1 : Tube à rayon X (CEA, 2014).



### ***b. Collimateurs et filtration***

Les collimateurs, filtres et éléments de blindage varient selon les appareils mais offrent toujours les mêmes fonctions. Ils filtrent le spectre de rayons X, définissent l'épaisseur des coupes, protègent les détecteurs des radiations diffusées et assurent une protection générale contre les radiations. Le collimateur sert à assurer une bonne qualité d'image et à réduire les doses de rayonnement inutiles pour le patient. Il est composé de matériaux très absorbants comme le tungstène ou le molybdène. Deux collimateurs sont présents :

- Le collimateur pré-patient est placé entre le tube à rayons X et le patient. Il sert à régler la largeur du faisceau de rayons X, avant qu'il ne pénètre dans le patient, en restreignant la zone à examiner : il définit en fait l'épaisseur de la coupe.
- Le collimateur post-patient est placé entre le patient et le détecteur. Il améliore la sensibilité des coupes en donnant une forme rectangulaire.

Les filtres ont pour but de supprimer les rayonnements à faible énergie qui participent à la dose reçue par le patient et à la diffusion du rayonnement mais pas au signal détecté (Saunders et Ohlerth, 2011).

### ***c. Systèmes de détection***

Le détecteur enregistre la quantité de rayonnement ionisant incident. Il existe deux types de détecteurs : les chambres d'ionisation et les cristaux scintillants. C'est le second qui est principalement utilisé de nos jours et décrit ici. Il est composé de cristaux tels que l'iodure de césium ou le tungstate de cadmium, et de matériaux céramiques tels que l'oxysulfure de gadolinium. Soumis à une stimulation par les rayons X, ces cristaux émettent une lumière dont l'intensité est proportionnelle au faisceau reçu. Cette lumière est ensuite convertie en signal électrique qui est ensuite amplifié et converti en forme numérique (Ruel, 2000 ; Saunders et Ohlerth, 2011).

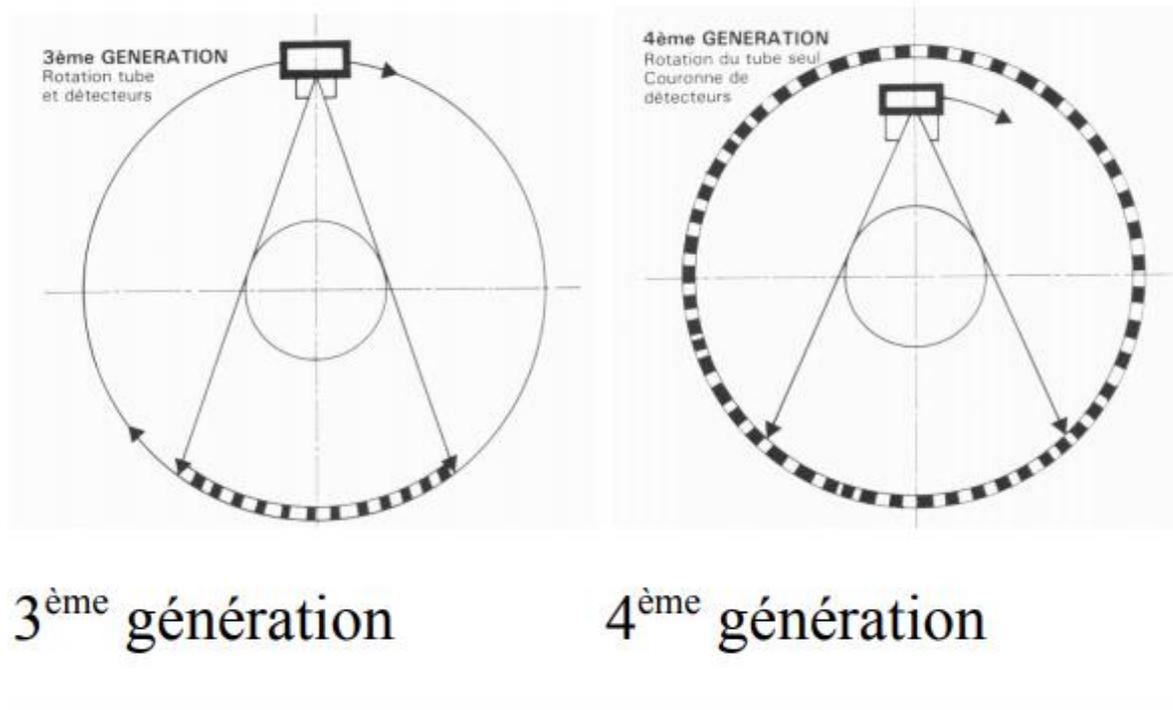
### ***d. Anatomie du portique***

Avec l'évolution, plusieurs générations de scanners ont vu le jour, permettant un examen plus rapide et plus précis. Aujourd'hui ce sont principalement les scanners de troisième et quatrième générations qui sont utilisés. Dans les scanners de troisième génération, le tube à rayons X et les détecteurs (300 à 700 capteurs) tournent conjointement, on parle de mouvement de « rotation-rotation » comme sur la figure 2. Tandis que dans ceux de quatrième génération, les détecteurs (jusqu'à 2400 capteurs) sont disposés en couronne tout autour du patient et seul le tube à rayons X tourne, on parle de système « rotation-fixe » comme sur la figure 2 (Ruel, 2000 ; Saunders et Ohlerth, 2011 ; Contardi et al., 2019).

Les composants du portique nécessitent un certain nombre de connexions électriques. Dans les systèmes les plus anciens, ces connexions étaient établies à l'aide de câbles de longueur finie et permettant une rotation d'environ 700 °. L'alternative à ce système de câble est la technologie à bague collectrice. Elle permet la rotation circulaire continue du tube à rayons X et des autres composants du portique. Elle a finalement permis la conception du scanner hélicoïdal moderne.

Le scanner hélicoïdal représente un système de scanner utilisant la technologie à bague collectrice dans laquelle une rotation continue du tube à rayons X est utilisée avec une translation de table simultanée et continue à travers le portique. Le tube à rayons X décrit ainsi un chemin hélicoïdal autour du patient. Les scanners hélicoïdaux peuvent être à coupe unique ou multi-coupes en fonction du nombre maximal d'images en coupe générées par rotation du portique. Aujourd'hui toutes les machines récentes sont multi-coupes et permettent d'imager un volume donné beaucoup plus rapidement (Figure 2, Saunders et Ohlerth, 2011).

**Figure 2 : Anatomie du portique des scanners de 3<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup> générations (Contardi et al., 2019).**



## B. Interprétation des images

### a. Coefficient d'atténuation

Le scanner forme des images dans différents niveaux de gris après réception d'un faisceau de rayons X qui a été atténué par la région corporelle étudiée. Les capteurs mesurent donc la quantité de rayons X ayant traversé la région corporelle, dont le coefficient d'atténuation peut alors être calculé. En mesurant l'atténuation des rayons X, il est possible de calculer la densité des tissus traversés.

Le coefficient d'atténuation, appelé  $\mu$ , est une quantité physique, fortement dépendante de l'intensité du faisceau incident, il ne peut donc pas être utilisé en tant que tel pour l'interprétation et la comparaison d'images. Pour cela, l'unité utilisée est le nombre scanner ou Unité Hounsfield (UH) qui prend en compte le coefficient d'atténuation du corps étudié et le compare à celui de l'eau, pris comme valeur de référence.

Calcul du nombre scanner ou UH d'un corps A :

$$\text{Nombre scanner corps A} = \frac{\mu A - \mu_{eau}}{\mu_{eau}} \times 1000$$

Ainsi, les valeurs en UH de différents tissus sont définies comme relativement stables et hautement indépendantes de l'intensité des rayons X émis (Ruel, 2000 ; Saunders et Schwarz, 2011).

### ***b. Représentation des densités***

À partir des valeurs mesurées par les détecteurs, l'ordinateur reconstruit une image en niveaux de gris sous la forme d'une coupe. Aux différents coefficients d'atténuation correspondent différentes tonalités de gris, et le récepteur peut distinguer au moins 4096 nuances de gris. L'atténuation complète des rayons X se traduit par un point blanc et l'absence d'atténuation par un point noir.

Cependant, l'œil humain ne peut distinguer que 30 à 90 nuances de gris et les écrans utilisés peuvent en distinguer 256. La technique utilisée pour examiner les images de façon précise est donc de n'utiliser qu'une partie de l'information en choisissant un niveau et une largeur de fenêtre.

Dans un premier temps, le lecteur se place donc au niveau du tissu d'intérêt, c'est-à-dire au niveau de sa densité, et les 256 densités situées autour de cette valeur seront représentées. L'information globale n'est pas perdue, mais elle n'apparaît pas à l'écran. Toutes les valeurs inférieures sont représentées en noir et toutes les valeurs supérieures en blanc (Ruel, 2000 ; Saunders et Schwarz, 2011).

Dans un second temps, à un niveau déterminé, on choisit la largeur de la fenêtre. En réduisant la largeur de la fenêtre, on va augmenter le contraste et donc mieux distinguer des densités très proches les unes des autres. À l'inverse, si on élargit la fenêtre, on représente sur une même échelle de gris des densités très différentes, on diminue donc le contraste (Ruel, 2000).

## **C. Qualité et traitement de l'image**

### ***a. Résolution, bruit et exposition du patient***

La résolution de l'image dépend de la finesse et de la taille de la matrice. Pour une même surface, la représentation sera plus exacte si le nombre de pixels est plus grand. L'augmentation de la finesse de la matrice est limitée car elle implique l'augmentation de l'irradiation du patient. En effet, si le nombre de pixels augmente et le nombre de rayons X reste identique, il n'y aura plus un nombre suffisant de rayons X par pixel pour obtenir des mesures précises en raison du bruit associé à la mesure, signal aléatoire qui se surajoute à l'image et en brouille l'information. L'amélioration de la résolution implique donc une irradiation supérieure.

La finesse de l'image peut aussi augmenter en choisissant des coupes plus fines. La conséquence est la même, une augmentation de l'irradiation pour obtenir une image de meilleure qualité. Pour augmenter la dose reçue par les détecteurs, il faut augmenter le milliampérage (mA), les kilovolts (kV) ou le temps d'exposition (s). L'animal étant anesthésié, il est possible d'augmenter ce dernier critère sans craindre un flou cinétique (Ruel, 2000).

### ***b. Filtres***

Les filtres permettent de modifier l'apparence de l'image afin de se focaliser sur un type de structure en particulier et ainsi mieux la visualiser.

Le filtre osseux, comme son nom l'indique, permet de mieux visualiser les tissus osseux. Pour cela, il privilégie la résolution spatiale de l'image et renforce les détails.

Le filtre tissus mous permet lui de mieux visualiser ces tissus. Pour ce faire, la résolution spatiale est diminuée et le contraste augmenté (Ruel, 2000).

### ***c. Reconstruction multiplans***

L'examen scanner permet de reconstruire artificiellement des coupes dans des plans différents du plan d'acquisition de la machine. En effet, les images scanner sont acquises sous forme de coupes transversales du patient. Les données sont empilées le long de l'axe déterminé par l'orientation du patient pour créer un volume, puis redécoupées à nouveau le long des autres plans pour créer des coupes sagittales, dorsales ou obliques. Ainsi il suffit d'orienter l'image sur un axe, n'importe lequel dans l'espace, pour ensuite avoir toutes les images reconstituées dans cet axe. C'est ce qu'on appelle la reconstruction multiplans (MPR pour multiplanar reconstruction). La qualité de ce mode augmente avec la finesse des coupes. La reconstruction multiplans peut s'avérer très utile pour l'évaluation précise de certaines lésions dans l'espace (Kinns et al., 2011).

### ***d. Reconstruction en trois dimensions (3D)***

Le scanner, par sa très grande précision en matière de densité radiographique, permet par des techniques de seuillage et de modélisation 3D d'obtenir des reconstructions surfaciques 3D des formations anatomiques examinées notamment des formations osseuses ou des tissus mous injectés. Ce mode de représentation 3D est très intéressant pour une évaluation volumique des lésions (ex : modélisation en 3D d'une fracture complexe) et à titre pédagogique pour des étudiants vétérinaires tout comme pour la présentation d'informations aux clients/propriétaires des animaux examinés.

Les lésions, qu'elles affectent l'appareil locomoteur ou qu'elles concernent les tissus mous ou les vaisseaux, sont beaucoup plus faciles à comprendre lorsqu'elles sont visualisées à l'aide de cette méthode.

Un autre mode est la projection d'intensité maximale (MIP pour Maximal Intensity Projection) qui utilise l'intensité maximale rencontrée par chaque rayon et l'affiche sous la forme d'une projection bidimensionnelle pouvant être pivotée sur n'importe quel plan pour une évaluation tridimensionnelle. Dans le rendu en volume, chaque voxel est représenté en utilisant une opacité et une couleur pour donner à l'image résultante un aspect réaliste. Les gammes de couleurs utilisées peuvent être personnalisées par l'utilisateur pour créer une variété d'effets visuels.

La reconstruction par projection d'intensité maximale est particulièrement utile pour évaluer les vaisseaux sanguins après injection de produit de contraste. Comme la plupart des formations anatomiques environnantes sont automatiquement supprimées de l'image, les vaisseaux peuvent être visualisés plus facilement qu'avec les techniques de reconstruction multiplanaires ou 3D standard (Kinns et al., 2011).

## **D. Produit de contraste**

Le produit de contraste peut être utilisé pour de nombreuses applications, nous nous intéresserons ici à l'administration intravasculaire et intra-articulaire. En effet, l'utilisation de produit de contraste améliore l'utilité clinique du scanner pour l'identification et la caractérisation des lésions des tissus mous incluant les tendons, les ligaments et les formations synoviales (Pollard et Puchalski, 2011).

### ***a. Intra-articulaire***

L'injection de produit de contraste en intra-articulaire permet de mettre en évidence la synoviale articulaire étudiée et donc des défauts de l'articulation. L'épaisseur du cartilage peut être appréciée en évaluant la largeur de l'espace entre l'os sous-chondral et le produit de contraste. Le produit de contraste peut également remplir un défaut d'ossification sous-chondral, confirmant une communication avec l'espace articulaire (Saunders et Bergman, 2011).

### ***b. Intravasculaire***

L'utilisation de produit de contraste en injection intravasculaire permet de voir les détails anatomiques du réseau vasculaire. D'abord, le produit de contraste met directement en évidence le flux sanguin et les vaisseaux/capillaires associés. Puis, étant donné que la plupart des agents de contraste sont de petites particules, elles diffusent librement à travers les parois endothéliales, de sorte que le second mécanisme de mise en évidence du contraste est le reflet de la perméabilité vasculaire.

L'intérêt est d'identifier et caractériser les lésions des tissus mous, quantifier le flux sanguin et effectuer un angiogramme sélectif. Le moment choisi pour le début de la perfusion du produit de contraste devrait en permettre l'afflux et l'extravasation dans les régions lésées avant l'acquisition du scanner afin de mieux caractériser les lésions des tissus mous.

Chez la plupart des espèces, une dose systémique corporelle totale est administrée par voie intraveineuse. Cependant, la dose systémique de produit de contraste chez le cheval n'a pas été établie. En règle générale, la dose systémique équine est extrapolée à partir de données chez l'homme ou le petit animal, ce qui entraîne l'administration d'un grand volume de produit de contraste. Le produit de contraste est difficile à administrer, peut coûter très cher et en pratique, il n'est pas envisageable par voie systémique d'atteindre les concentrations sanguines utilisées en médecine humaine. Pour contourner cette limite majeure tout en bénéficiant de la technique, l'administration locale de produits de contraste via une artère périphérique peut être utilisée dans certains sites anatomiques d'importance clinique.

Pour quantifier le flux sanguin, plusieurs images doivent être obtenues avant l'arrivée du produit de contraste dans la région. Cela peut être fait avec des protocoles spécialisés et un logiciel dédié. Dans ces protocoles, la numérisation commence avant l'injection de produit de contraste. Pour effectuer une angiographie, afin d'évaluer la perméabilité vasculaire (dans le cas de la fourbure) ou le traumatisme d'un membre distal, la perfusion de produit de contraste doit commencer au moment de l'acquisition ou juste avant.

L'interprétation d'images avec produit de contraste injecté par voie intra-artérielle nécessite une approche méthodique avec une comparaison simultanée avec des images pré- et post-contraste. Le produit de contraste facilite l'interprétation de plusieurs manières, principalement en

augmentant la visibilité des lésions. Le produit de contraste peut également aider à caractériser les lésions, à évaluer la cicatrisation au fil du temps et à identifier les zones d'hyperhémie.

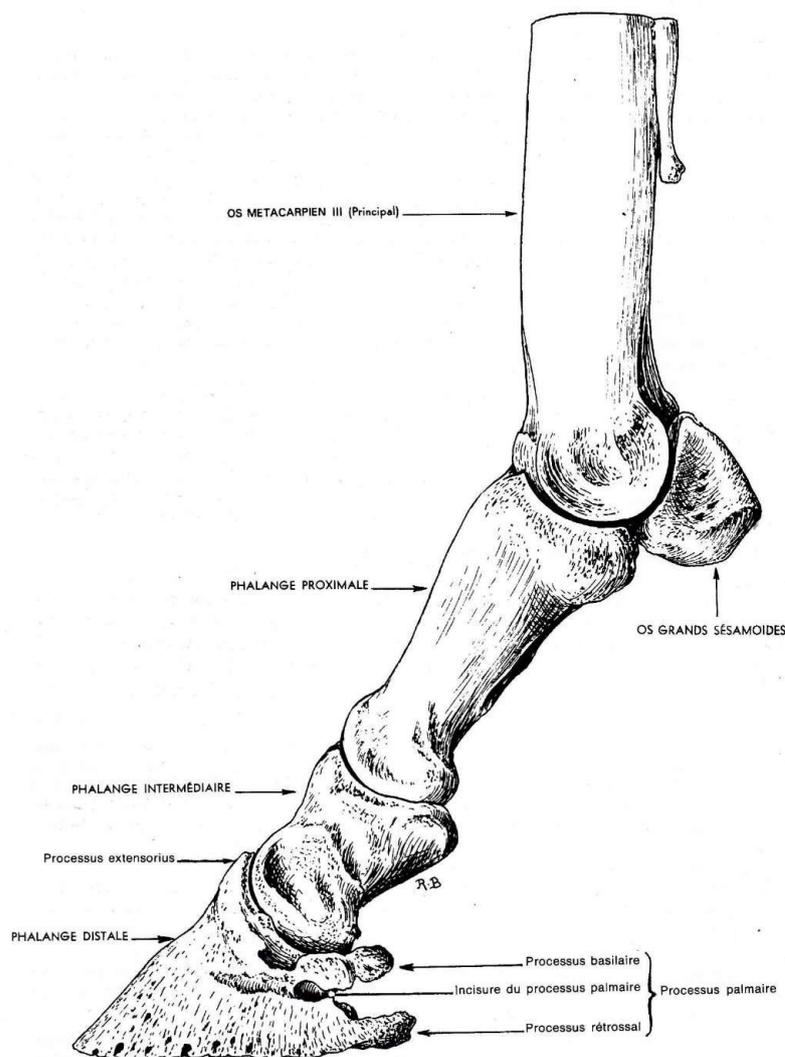
Les lésions des tendons et des ligaments sont généralement mises en évidence par extravasation du produit de contraste ou par la formation de néovaisseaux. Le couplage de l'analyse des tissus mous avec produit de contraste et des avantages de la tomographie pour l'imagerie osseuse constitue une excellente technique d'évaluation complète de nombreuses régions anatomiques impliquées dans une boiterie équine (Pollard et Puchalski, 2011).

## 2. Anatomie de la région du boulet

### A. Ostéologie

Le boulet du cheval désigne l'articulation métacarpo-phalangienne ou métatarso-phalangienne. Cette articulation met en relation 4 os : l'os métacarpien III, la phalange proximale et les os sésamoïdes proximaux. Les os métacarpiens II et IV apparaissent sur les images de tomographie mais n'appartiennent pas à l'articulation (Figure 3, Barone, 1986).

**Figure 3 : Doigt du cheval, membre thoracique en vue latérale (Barone, 1986).**



### a. Boulet du membre thoracique

- Os métacarpien III (canon) :

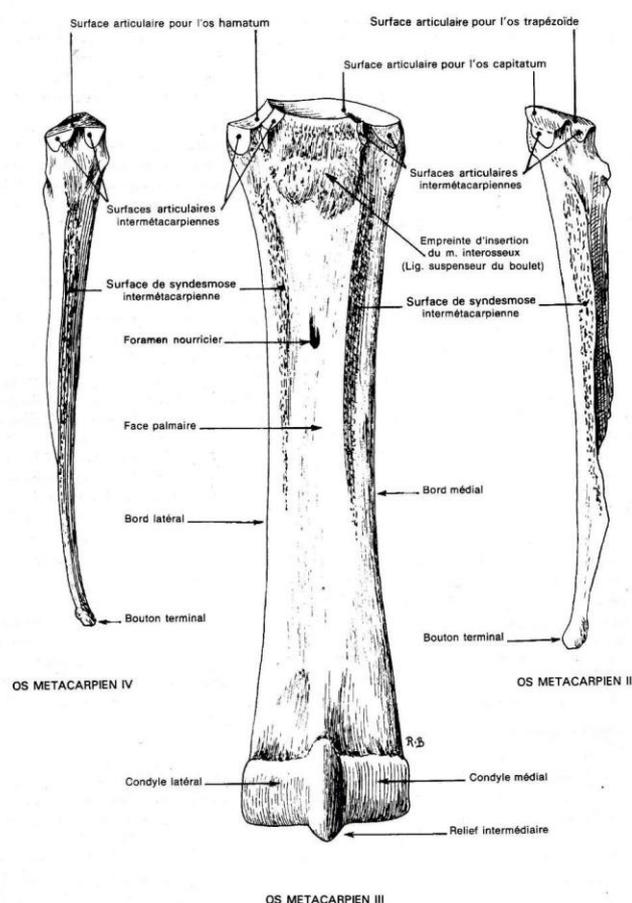
Il s'agit de l'os le plus proximal de l'articulation du boulet. L'os est droit, vertical et cylindroïde, plus ou moins aplati dans le sens dorso-palmar. L'extrémité distale (Caput) est constituée de deux gros condyles dont la convexité est dorso-palmar, séparés par un relief sagittal plus saillant en région palmaire. Le condyle médial est plus large que le latéral. De chaque côté des condyles se trouve une fosse d'insertion ligamentaire dite collatérale (Figure 4, Barone, 1986, *Nomica Anatomica*, 2005).

Dans l'ouvrage du Professeur Denoix (2001), la partie distale de l'os métacarpien III est décrite comme un unique condyle possédant une partie médiale et une partie latérale. Les utilisateurs du diaporama et des questionnaires liés à cette thèse seront confrontés à cette dénomination anatomique dans ces ressources.

- Os métacarpiens rudimentaires :

Ils sont allongés et plaqués à la face palmaire de l'os métacarpien III. Ils sont distingués en médial (ou II) et latéral (ou IV). L'extrémité distale se termine par un petit renflement ou bouton, qui, contrairement à la partie moyenne, ne se soude jamais à l'os métacarpien principal. L'os métacarpien médial est toujours le plus épais et souvent le plus long (Figure 4, Barone, 1986).

**Figure 4 : Os métacarpiens II, III, IV, disjoints en vue palmaire (Barone, 1986).**



- Phalange proximale :

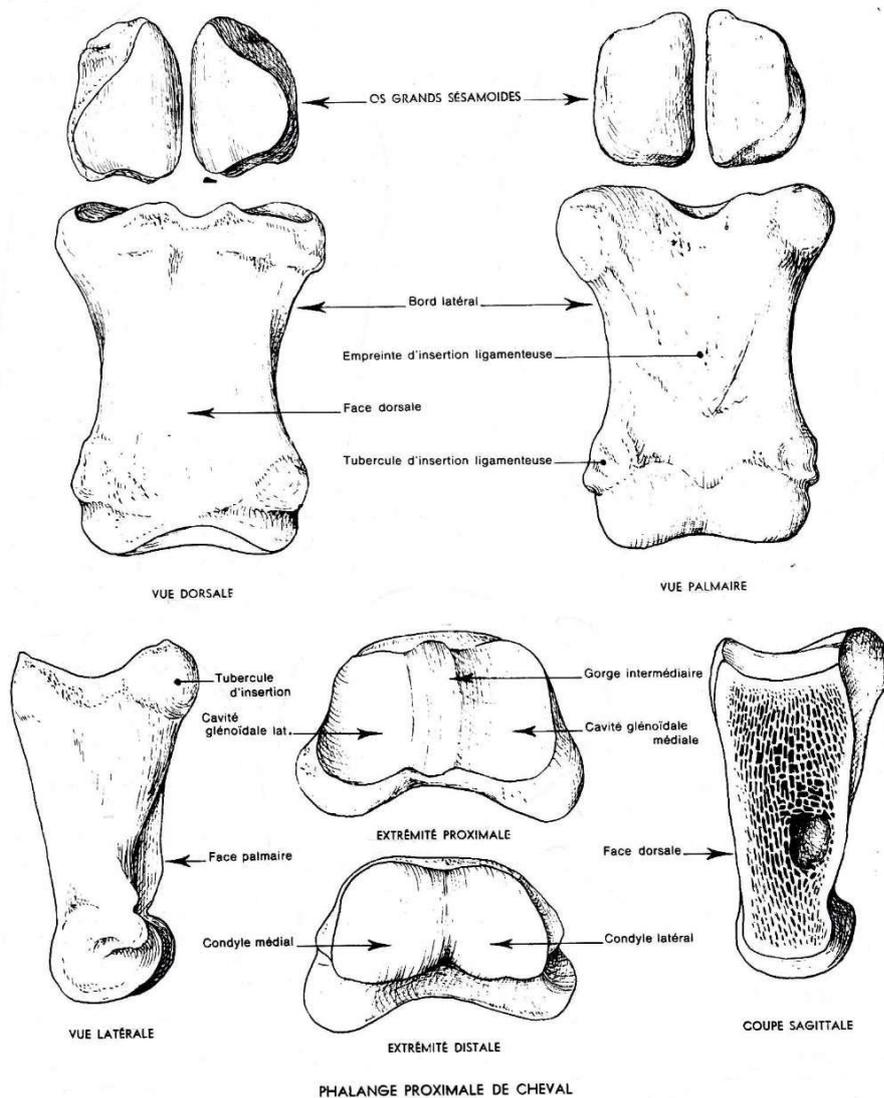
Le doigt du cheval est constitué de 3 phalanges. Seule la plus proximale est impliquée dans l'articulation du boulet. La phalange proximale possède un corps et deux extrémités : le corps est aplati en dorso-palmaire et s'affine en portion distale. La face dorsale est convexe, la face palmaire est planiforme. L'extrémité proximale est la plus volumineuse et comporte deux cavités glénoïdales séparées par une gorge sagittale dorso-palmaire. L'extrémité distale dite trochlée possède une surface articulaire constituée par deux reliefs condyloïdes un peu inclinés sur une gorge intermédiaire. Le condyle médial est un peu plus fort. L'extrémité distale est pourvue de chaque côté d'une dépression à insertion ligamentaire (Figure 5, Barone, 1986).

- Os sésamoïdes proximaux :

Ils sont deux, un latéral et un médial. Ils ont une face articulaire qui répond au condyle métacarpien, une face axiale (Facies flexoria) où coulissent les tendons fléchisseurs et une face abaxiale (Facies m. interossei) destinée à l'attache terminale des branches du muscle interosseux III (Figure 5, Barone, 1986, *Nomica Anatomica*, 2005).

Dans l'ouvrage du Professeur Denoix (2001), la face axiale de l'os sésamoïde proximale est nommée « surface des fléchisseurs » et la face abaxiale est nommée « surface du muscle interosseux ». Les utilisateurs diaporama et des questionnaires liés à cette thèse seront confrontés à cette dénomination anatomique.

Figure 5 : Phalange proximale et os sésamoïdes proximaux (Barone, 1986).



**b. Boulet du membre pelvien**

- Os métatarsiens :

L'os métatarsien III est plus long (un septième environ) et plus fort que l'os métacarpien III. Il est cylindroïde puis s'aplatit dans le sens dorso-plantaire à son tiers distal. L'extrémité distale est identique à celle de l'os métacarpien III. Les métatarsiens II et IV sont aussi plus longs d'un septième et sont très inégaux : le métatarsien IV est plus volumineux et long que le II. Ceux-ci sont plus rapprochés que ceux des membres thoraciques (Figure 6, Figure 7, Barone, 1986).

Figure 6 : Os du membre pelvien, vue latérale (Barone, 1986).

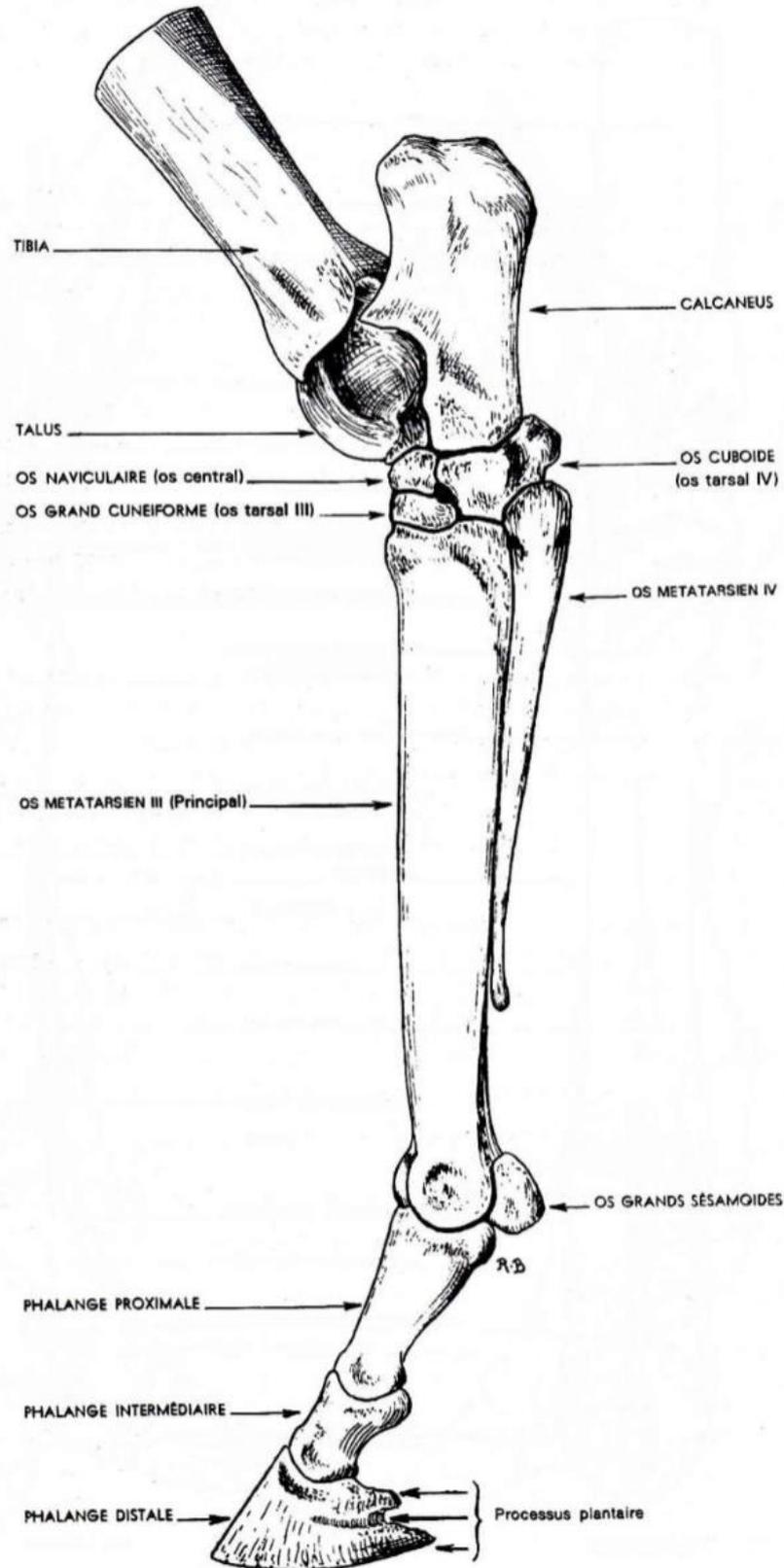
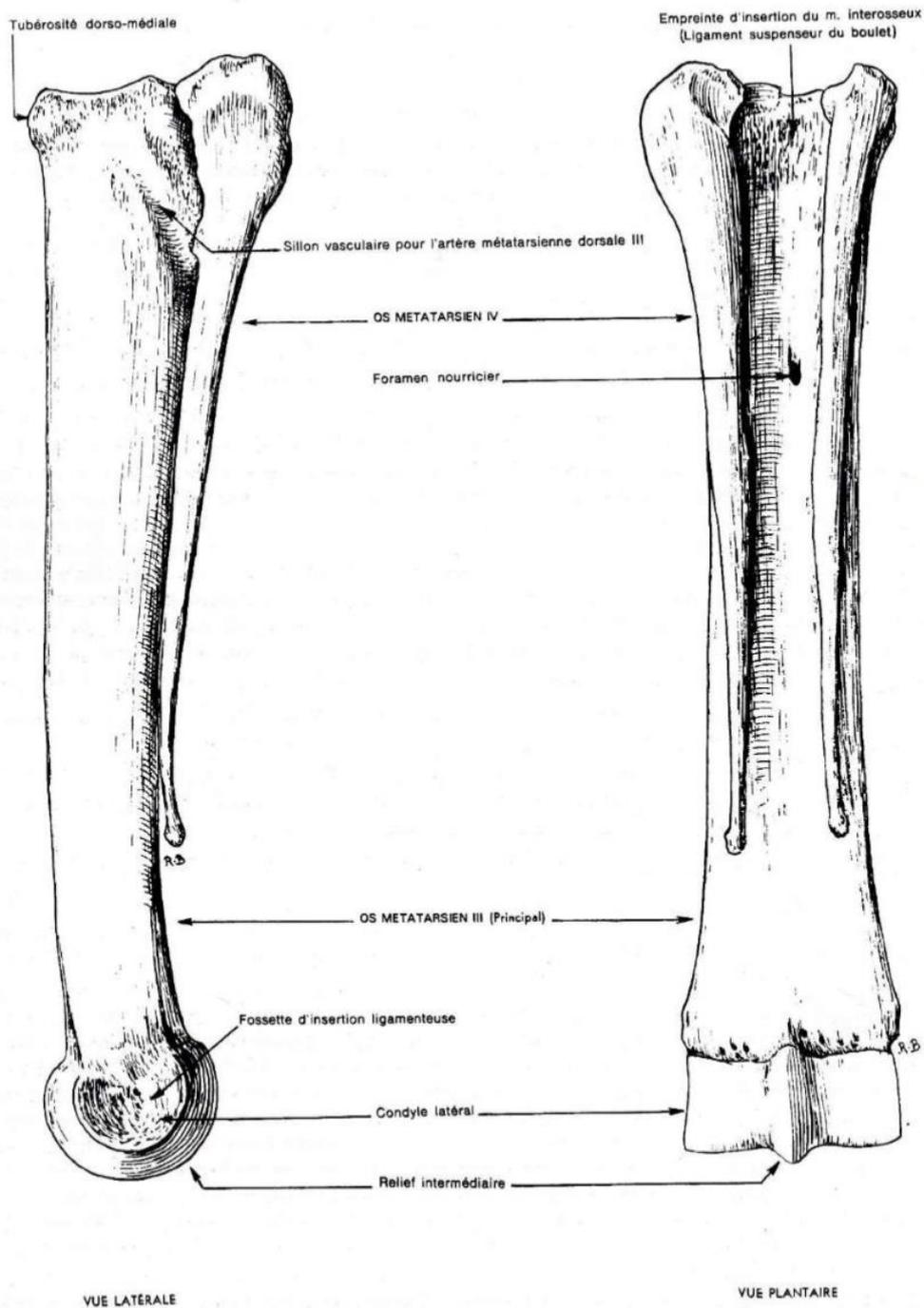


Figure 7 : Os métatarsiens gauches, vue latérale et vue plantaire (Barone, 1986).



- Phalange proximale et os sésamoïdes proximaux :

La phalange proximale est identique à celle du membre thoracique. Les os sésamoïdes proximaux sont identiques dans leur aspect mais légèrement plus petits que sur les antérieurs (Barone, 1986).

## **B. Arthrologie, moyens d'union et synoviale**

L'arthrologie des boulets des membres thoraciques et pelviens est identique.

### ***a. Métacarpe et phalange proximale***

Les ligaments collatéraux médial et latéral sont symétriques. Ils sont constitués de faisceaux superficiel et profond. Les fibres superficielles partent du bord latéral de l'os métacarpien principal, un peu en dessous du bouton terminal du métacarpien rudimentaire et se terminent sur l'extrémité proximale de la phalange proximale en recouvrant l'insertion du ligament sésamoïdien collatéral. Le faisceau profond part des fosses collatérales, se porte en direction disto-palmaire et se termine en confondant ses fibres avec celles du ligament sésamoïdien collatéral (Barone, 2000).

### ***b. Métacarpe et os sésamoïdes proximaux***

Il n'y a que quelques fibres des ligaments sésamoïdiens collatéraux (Barone, 2000).

### ***c. Phalange proximale et os sésamoïdes proximaux***

- Ligaments sésamoïdiens collatéraux :

Ils partent de la face abaxiale des os sésamoïdes proximaux et s'insèrent sur le tubercule médial ou latéral de la phalange proximale.

- Ligaments sésamoïdiens distaux :

Le ligament droit : aplati dans le sens dorso-palmaire, il est large à son extrémité proximale et se rétrécit à l'opposée. Il part de la base des os sésamoïdes proximaux ainsi que du bord correspondant du ligament palmaire (intersésamoïdien) et se termine sur le scutum moyen (sur la face palmaire de la phalange proximale). Sa face palmaire contribue à former la gaine digitale.

Un ligament moyen ou oblique : il est formé de trois faisceaux. Le faisceau médian est mince, élargi en éventail à sa partie proximale ; les deux faisceaux latéraux sont plus épais et rectilignes. Ces trois faisceaux naissent sous le ligament précédent à la base des os sésamoïdes proximaux et sur le ligament intersésamoïdien ; ils se terminent en commun sur la surface triangulaire rugueuse de la face palmaire de la phalange proximale.

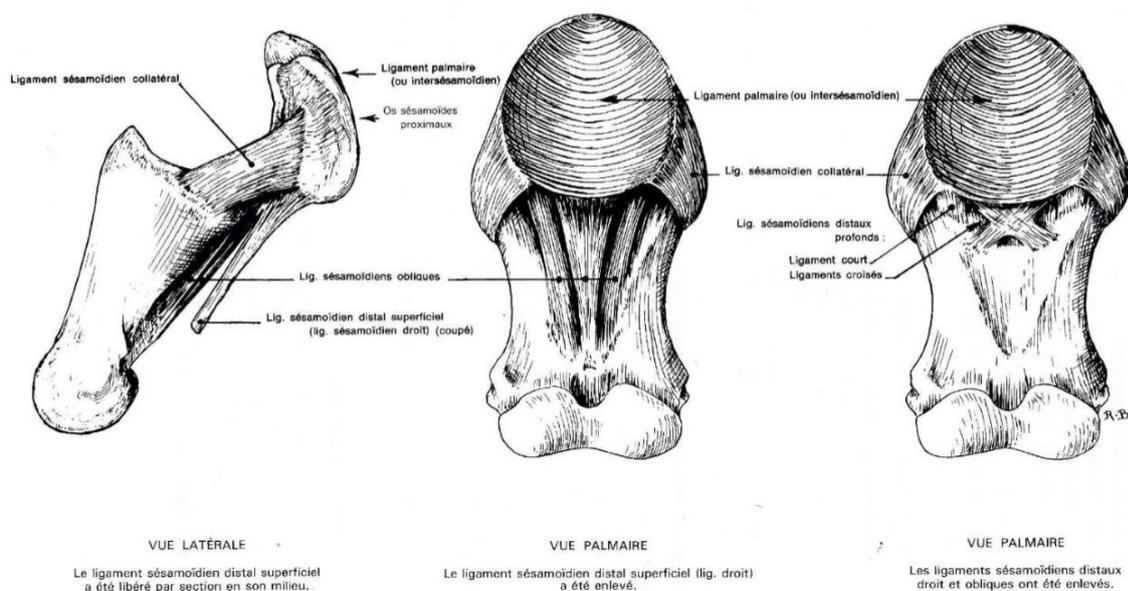
Les deux ligaments croisés : ils sont étendus de la base des os sésamoïdes proximaux à la face palmaire de la partie adjacente de la phalange proximale.

Les deux ligaments courts : chacun d'eux se porte de la base d'un os sésamoïde proximal au revers correspondant de la surface articulaire phalangienne. Tous ces ligaments profonds sont tapissés par la synoviale sur leur face articulaire (Figure 8, Barone, 2000).

### ***d. Os sésamoïdes proximaux entre eux***

Le ligament palmaire nommé également ligament intersésamoïdien unit les deux os sésamoïdes proximaux. Ce ligament est très épais chez les chevaux. Les fibres sont insérées dans un tissu fibro-cartilagineux qui déborde en médial et latéral sur les os sésamoïdes proximaux et contribuent ainsi à former avec ces derniers la surface de glissement des tendons fléchisseurs du doigt que l'on appelle le scutum proximal (Figure 8, Barone, 2000).

**Figure 8 : Ligaments sésamoïdiens de l'articulation métacarpo-phalangienne (Barone, 2000).**



#### **e. Maintien de l'articulation entière**

- Muscle interosseux III :

Il est entièrement formé chez l'adulte par du tissu fibreux au sein duquel persistent souvent des fibres musculaires striées. Sa partie proximale est clivable en deux plans superposés et très adhérents, par l'intermédiaire desquels se font les attaches d'origine. Le plan superficiel s'attache sur les os du carpe. Le plan profond, beaucoup plus épais, prend une attache solide et étendue sur les rugosités palmaires de l'extrémité proximale de l'os métacarpien III. La partie distale s'écarte progressivement de ce dernier et se divise à son tiers distal en deux branches qui s'insèrent chacune sur la partie abaxiale des os sésamoïdes proximaux. Les branches ne contiennent plus de fibres musculaires. Les branches donnent alors chacune une bride qui contourne la phalange proximale pour s'insérer sur le tendon extenseur dorsal du doigt (Figure 9, Barone, 2000).

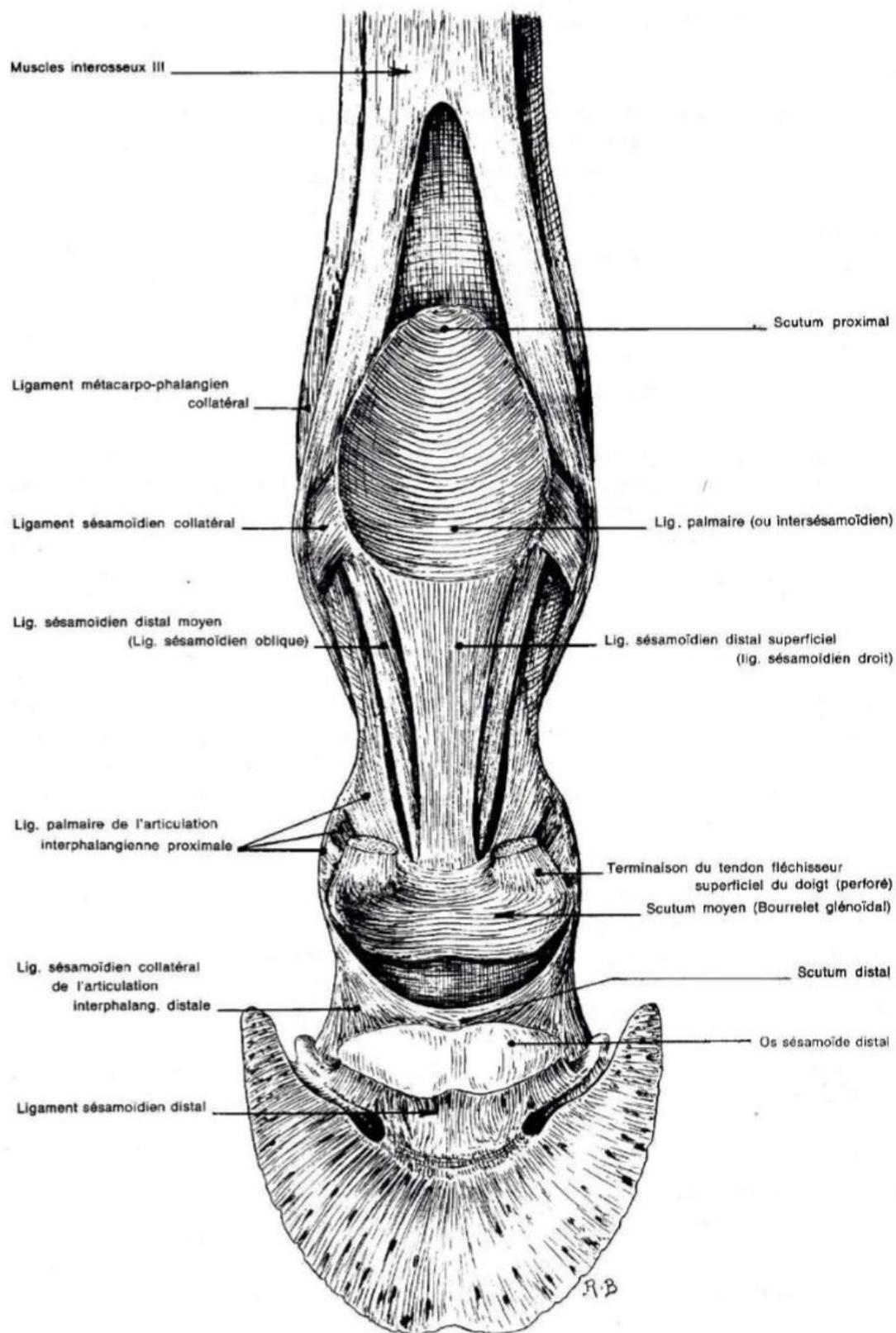
- Capsule articulaire :

Elle constitue aussi un moyen de cohésion supplémentaire de l'articulation. Elle englobe les différents ligaments et se renforce en portion dorsale entre les deux ligaments collatéraux (Barone, 2000).

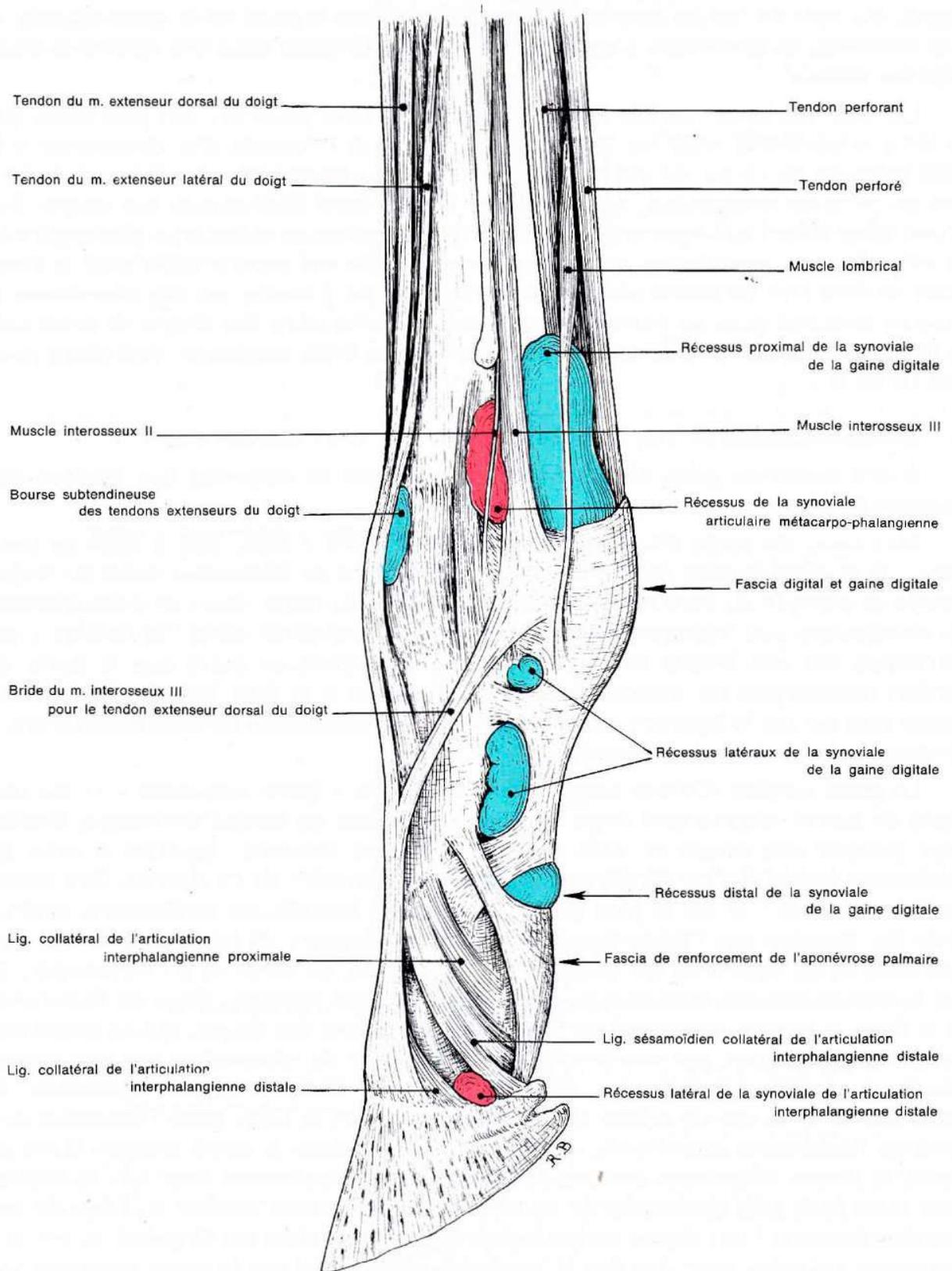
#### **f. Synoviale articulaire**

Il n'existe qu'une synoviale pour l'articulation métacarpo-phalangienne. Elle tapisse la face profonde des ligaments collatéraux et de la capsule articulaire fibreuse. Elle forme deux récessus, un dorsal et un palmaire. Le récessus dorsal est peu étendu, en revanche, le récessus palmaire est très vaste. Il s'adosse au ligament intersésamoïdien et aux ligaments sésamoïdo-phalangiens. Il remonte au-dessus des os sésamoïdes proximaux, entre les branches du muscle interosseux et l'extrémité distale de l'os métacarpien III (Figure 10, Barone, 2000).

Figure 9 : Vue palmaire des différents moyens d'union de l'articulation du boulet thoracique (Barone, 2000).



**Figure 10 : Synoviales tendineuses (en bleu) et articulaires (en rouge) du boulet d'un membre thoracique en vue latérale (Barone, 2000).**



## C. Myologie

### a. Membre thoracique

Seuls les tendons des muscles décrits ci-dessous sont impliqués dans le boulet (Figure 11).

- Tendon extenseur dorsal du doigt :

Il naît sur l'épicondyle latéral de l'humérus. Son corps charnu se termine au tiers distal de l'avant-bras après s'être divisé en deux branches très inégales. La plus forte, qui représente l'extenseur dorsal du doigt, se continue par un tendon qui passe à la face dorsale du carpe et qui s'élargit en atteignant le boulet. Le tendon reçoit en regard de l'extrémité distale de la phalange proximale la bride correspondante provenant du muscle interosseux. Il prend insertion à la face dorsale de la phalange moyenne et se termine sur le processus extensorius de la phalange distale.

La seconde branche du muscle, beaucoup plus faible, est située latéralement et se prolonge par un grêle tendon qui se porte sur le tendon du muscle extenseur latéral du doigt. Ce tendon peut rester indépendant et se continuer jusqu'à la phalange proximale. Il porte alors le nom de « muscle de Philips ». Enfin, un chef accessoire et profond peut également se prolonger jusque sur la capsule de l'articulation métacarpo-phalangienne. C'est le « muscle de Thiernes », vestige de l'extenseur du pouce et de l'index.

- Tendon extenseur latéral du doigt :

Le corps charnu est grêle, prolongé par un long tendon. Il s'insère proximale sur le ligament collatéral latéral du coude et sur la tubérosité adjacente du radius, ainsi que sur les parois de sa gaine fibreuse. Il aboutit à la face dorsale et latérale de la phalange proximale.

- Tendon fléchisseur superficiel du doigt (tendon perforé) :

Le corps charnu prend origine au sommet de l'épicondyle médial de l'humérus en s'unissant au chef huméral du fléchisseur profond des doigts. Au-dessus des os sésamoïdes proximaux, il constitue la manica flexoria (anneau du tendon perforé) dans lequel s'engage le tendon fléchisseur profond du doigt. Au tiers distal de la phalange proximale, il se divise en deux branches qui se terminent sur les extrémités du scutum moyen (« bourrelet glénoïdal » de la phalange moyenne) et entre lesquelles passe le tendon perforant (Figure 12, Figure 13, Barone, 2000).

- Tendon fléchisseur profond du doigt (tendon perforant) :

Le corps charnu est constitué de 3 chefs qui s'insèrent chacun sur l'humérus, l'ulna et le radius. Les tendons issus des chefs radial et ulnaire joignent le tendon principal que donne le chef huméral. Proximale aux os sésamoïdes proximaux, il traverse la manica flexoria, puis reste caché par la partie distale du tendon fléchisseur superficiel du doigt jusqu'en regard du scutum moyen. Le tendon perforant passe alors entre les deux branches terminales du tendon perforé et s'élargit pour constituer l'aponévrose palmaire. Celle-ci glisse à la face palmaire de l'os sésamoïde distal, grâce à la bourse podotrochléaire et se termine sur la ligne semi-lunaire de la phalange distale ainsi que sur les rugosités situées au-delà de cette ligne. (Figure 12, Figure 13, Barone, 2000).

**Figure 11 : Rapport entre les tendons et les autres formations anatomiques du boulet thoracique, coupe sagittale (Barone, 2000).**

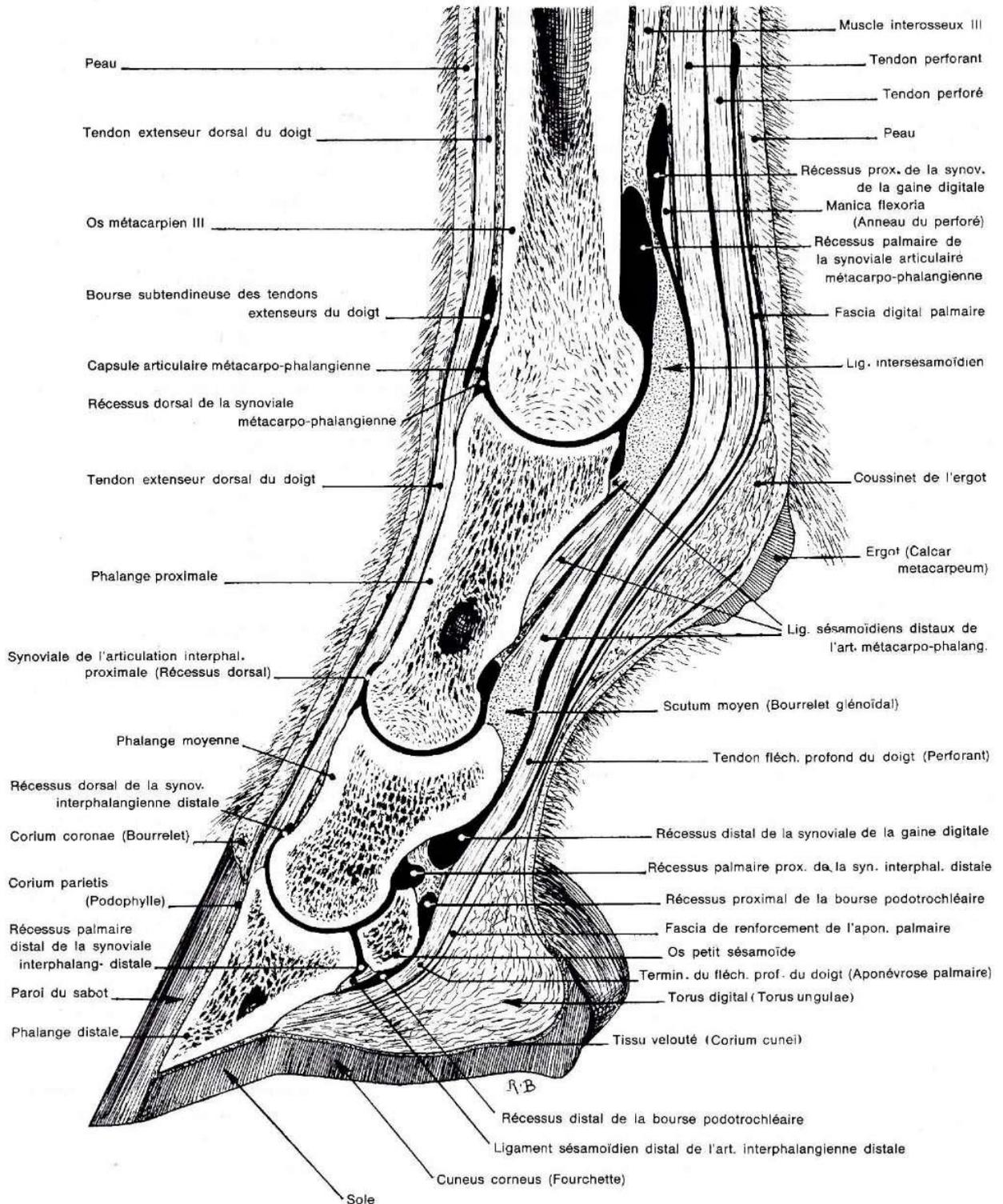
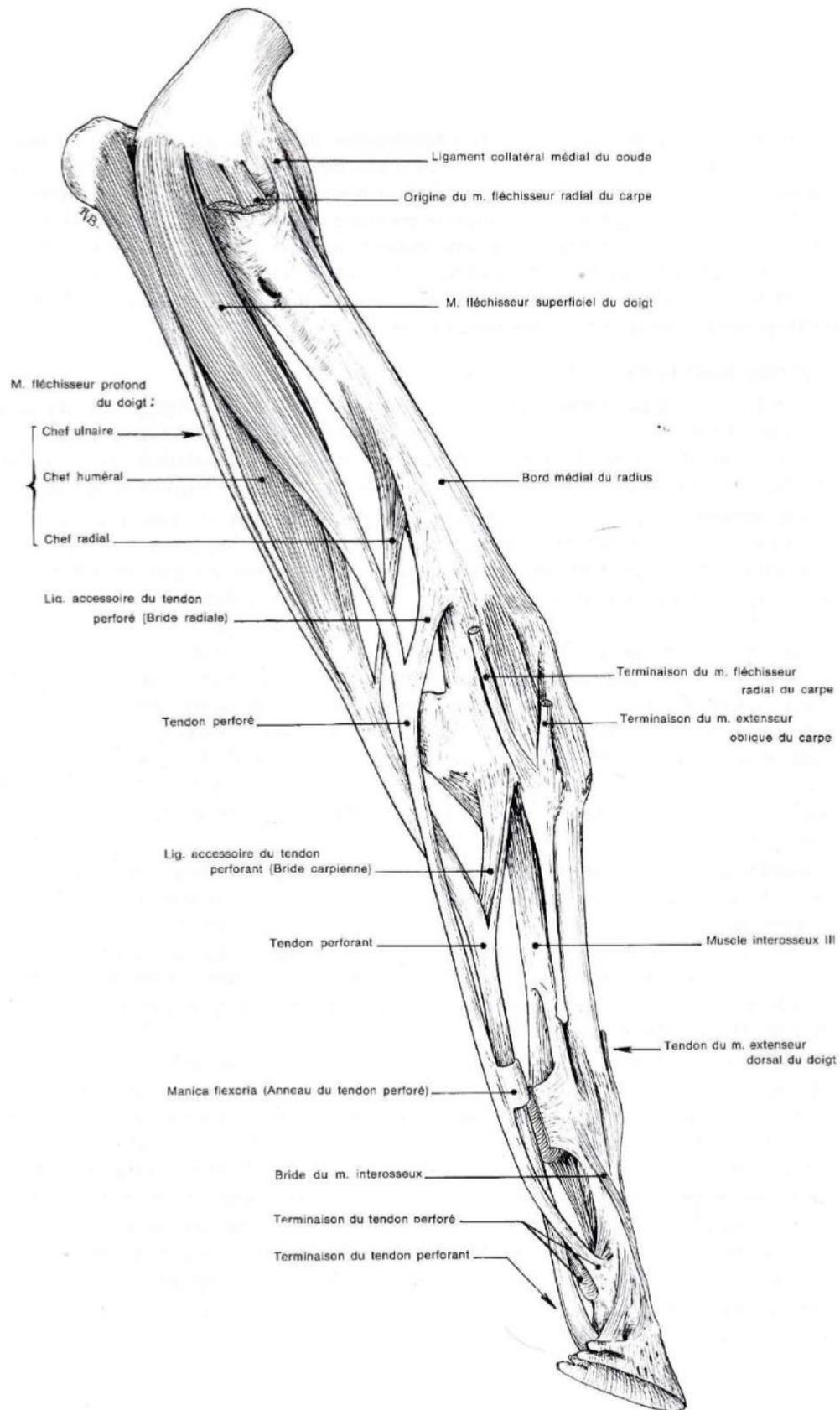
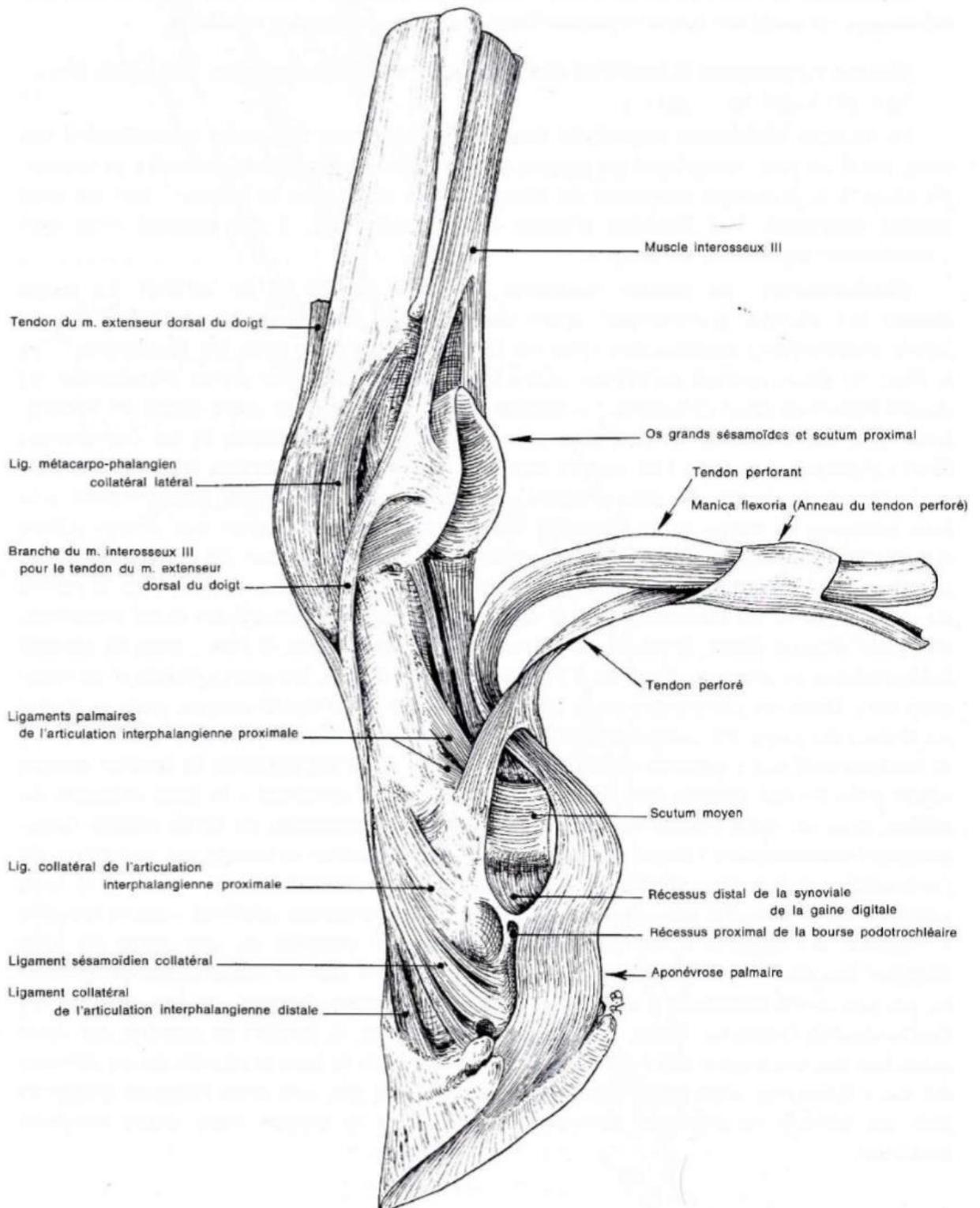


Figure 12 : Insertions proximales des muscles fléchisseurs du doigt, membre thoracique en vue médiale (Barone, 2000).



**Figure 13 : Insertions distales et rapports des muscles fléchisseurs du doigt, membre thoracique (Barone, 2000).**



### ***b. Membre pelvien***

Seuls les tendons et muscles décrits ci-dessous sont impliqués dans l'articulation du boulet (Figure 14).

- Tendon long extenseur du doigt :

Il s'insère sur la partie distale du fémur et se termine sur le processus extensorius de la phalange distale. Le tendon récupère, comme l'extenseur dorsal du doigt sur les antérieurs, les brides du muscle interosseux III.

- Tendon extenseur latéral du doigt :

Il part du tiers proximal de la fibula. Son tendon se mêle à celui du long extenseur du doigt en partie proximale du métatarse, il n'est ainsi pas retrouvé dans la région du boulet contrairement à celui des antérieurs.

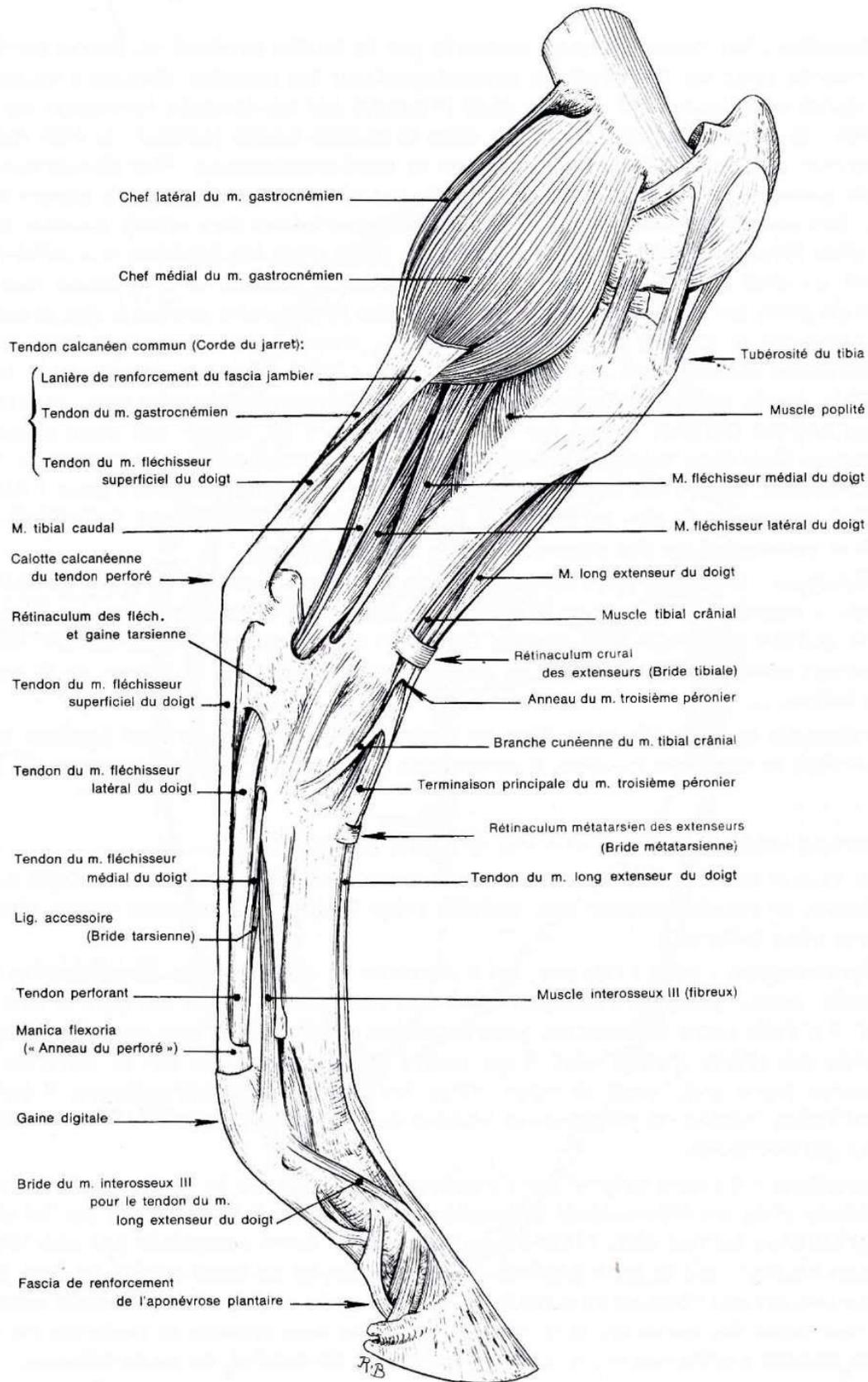
- Tendon fléchisseur superficiel :

Il s'insère proximale dans la fosse supra-condyloire du fémur, puis se comporte exactement comme son homologue du membre thoracique dans la région du boulet.

- Tendon fléchisseur profond du doigt :

Il s'insère sur la partie proximale du tibia et de la fibula proximaux et se comporte comme son homologue thoracique en région du boulet (Barone, 2000).

Figure 14 : Muscles de la jambe et du pied, vue médiale (Barone, 2000).



#### **D. Bourses, gaines, et fascias**

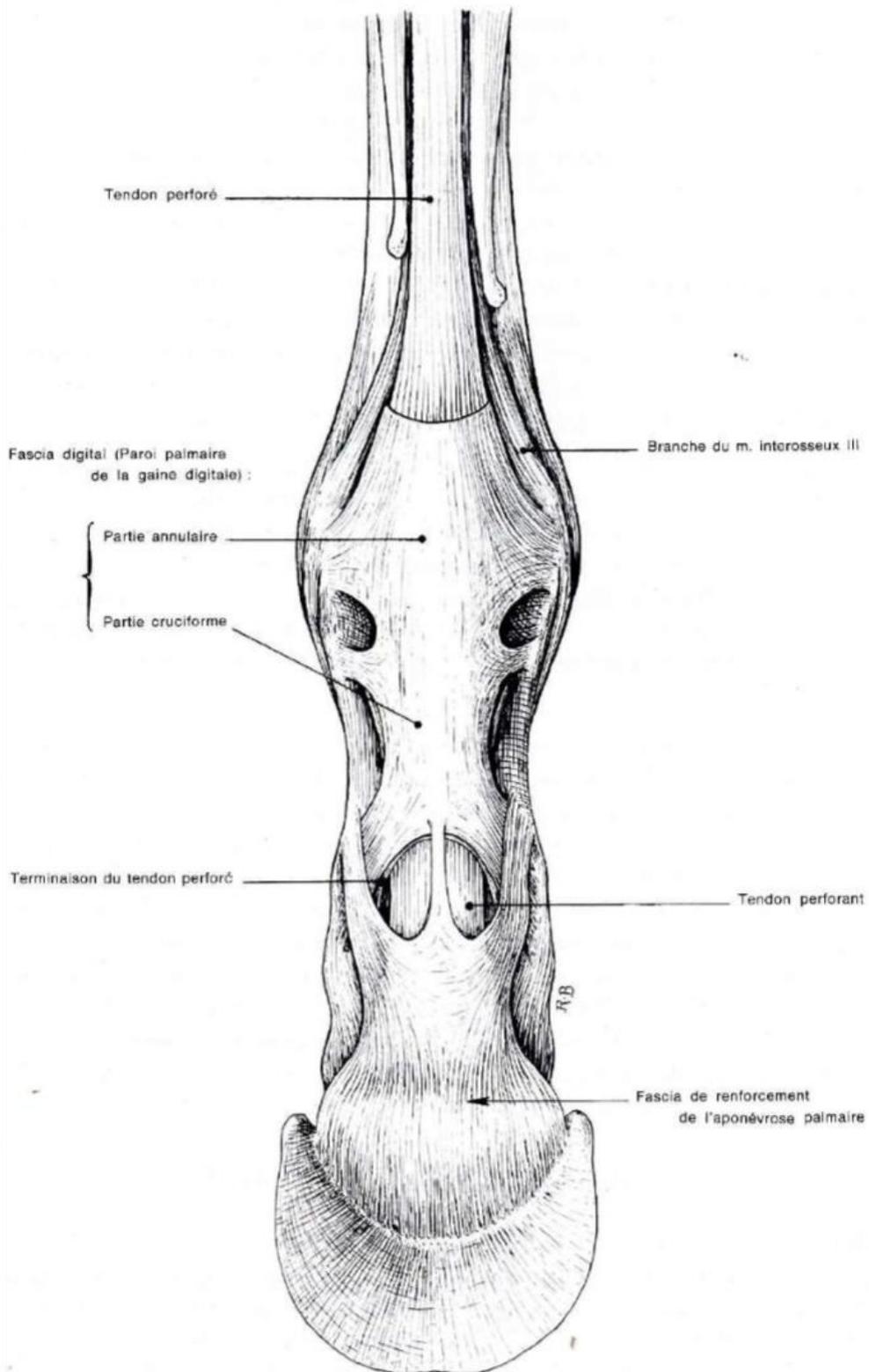
En partie dorsale se trouve la bourse subtendineuse pour le tendon du muscle extenseur dorsal du doigt mais il n'y a pas de véritable gaine.

En région palmaire : la gaine digitale est vaste et très solide. Sa paroi dorsale est constituée par le scutum proximal prolongée distalement par le ligament sésamoïdien droit puis par le scutum moyen. La paroi palmaire est formée par une vaste lame fibreuse. L'ensemble recouvre le tendon perforé et se fixe par trois brides de chaque côté : aux os sésamoïdes proximaux, aux bords latéral et médial de la phalange proximale et aux extrémités du scutum moyen (Figure 15).

Les tendons perforant et perforé sont enveloppés dans cette gaine par une vaste synoviale digitale qui constitue plusieurs récessus. Un récessus proximal remonte autour du tendon perforant jusqu'au niveau des boutons terminaux des os métacarpiens rudimentaires. La synoviale forme aussi un récessus distal qui accompagne les tendons fléchisseurs jusqu'à la face palmaire de la phalange moyenne (Figure 10).

Les formations anatomiques sont similaires sur le membre postérieur (Barone, 2000).

Figure 15 : Gaine de la main du cheval, vue palmaire (Barone, 2000).



## E. Angiologie

### a. Réseau artériel du membre thoracique

Le membre thoracique est irrigué par l'artère axillaire qui devient l'artère brachiale, qui elle-même est prolongée à l'articulation du coude par l'artère médiane. Les artères de la main sont très réduites en portion dorsale : les artères, radiale moyenne, interosseuse dorsale, radiale proximale et collatérales ulnaires donnent un réseau carpien dorsal ainsi que les artères métacarpiennes dorsales II et III. L'irrigation de la main est essentiellement palmaire.

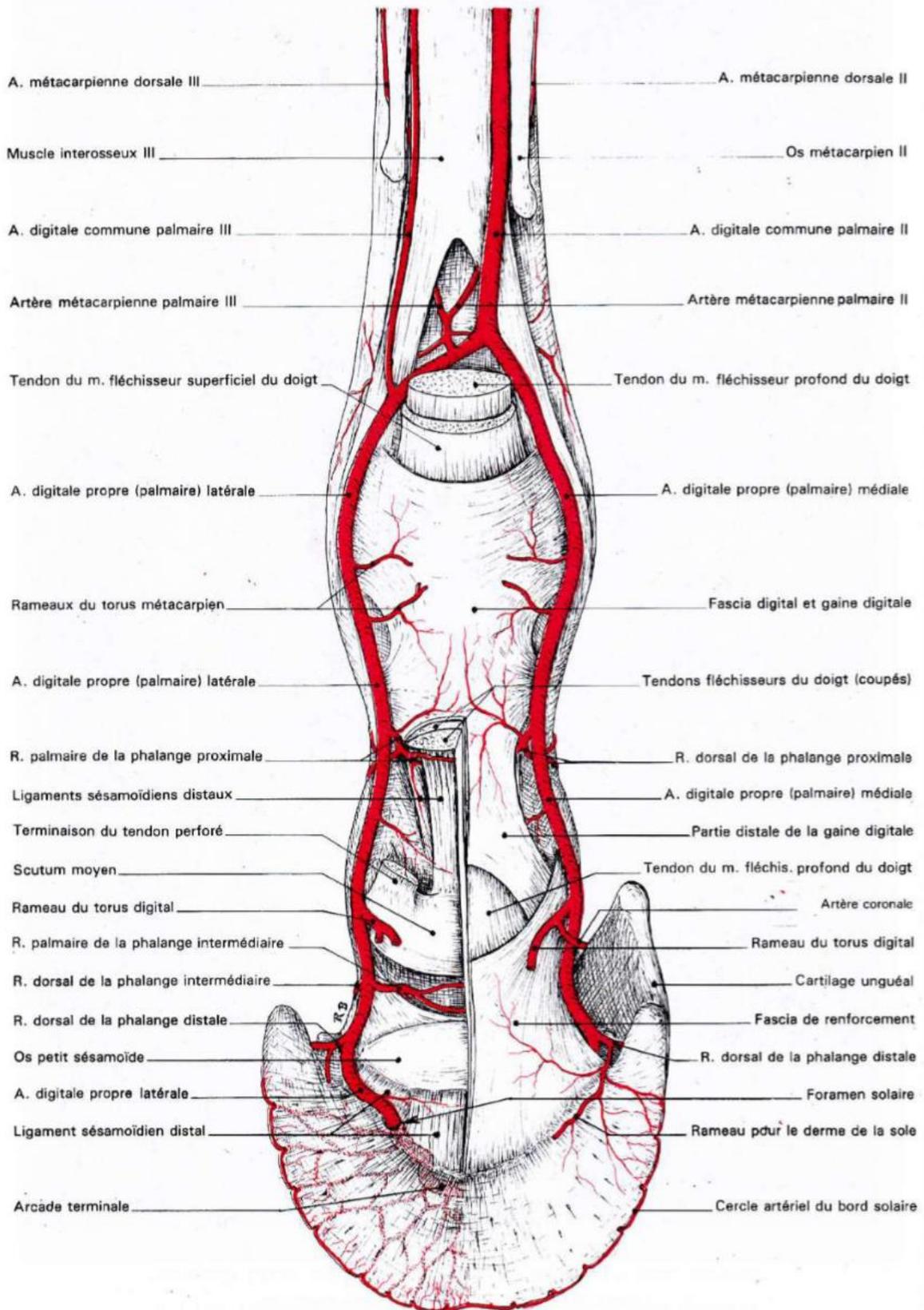
En partie palmaire, deux réseaux artériels parallèles se mettent en place : le premier est constitué par l'artère radiale distale, rameau de l'artère médiane, qui s'unit au rameau profond de l'artère collatérale ulnaire en une arcade palmaire profonde. Cette arcade donne naissance aux artères métacarpiennes palmaires II et III qui, s'anastomosant avec les artères métacarpiennes dorsales II et III, rejoignent l'artère digitale propre palmaire latérale. Les artères métacarpiennes dorsales II et III nourrissent le muscle interosseux III et la peau. L'artère collatérale ulnaire se prolonge en l'artère digitale commune palmaire III, grêle et latérale, qui se jette dans l'artère digitale propre palmaire latérale.

Le second réseau est donné par la continuation de l'artère médiane au-delà du canal carpien : l'artère digitale commune palmaire II, médiale et volumineuse. Les deux artères digitales communes descendent dans l'interstice qui sépare les deux fléchisseurs, entre la veine homonyme en dorsal et le nerf homonyme en palmaire.

L'artère digitale commune palmaire II se sépare en deux artères digitales propres, une médiale et une latérale, proximale à l'articulation métacarpo-phalangienne. Celles-ci descendent sur les côtés des os sésamoïdes proximaux puis longent le tendon fléchisseur profond du doigt avant de s'engager sous le cartilage unguulaire correspondant pour assurer la vascularisation du pied.

Chaque artère digitale propre donne une artériole pour le coussinet de l'ergot, des rameaux articulaires, tendineux, cutanés, un rameau palmaire et un rameau dorsal de la phalange proximale (Figure 16, Barone, 2011).

Figure 16 : Réseau artériel de la main du cheval, vue palmaire (Barone, 2011).



### ***b. Réseau veineux du membre thoracique***

La face dorsale du doigt est drainée par les affluents dorsaux des veines digitales palmaires. Il n'y a pas non plus de veine dorsale dans le métacarpe.

Les veines digitales propres palmaires drainent le réseau veineux du sabot. Chacune d'elle est placée dorsalement à l'artère et est encadrée par les rameaux dorsal et intermédiaire du nerf digital propre palmaire. Elles reçoivent au passage deux veines, dorsale et palmaire, qui forment le cercle veineux de la phalange proximale. À l'extrémité distale du métacarpe, elles s'insinuent entre la branche correspondante du muscle interosseux III et le tendon du muscle fléchisseur profond du doigt pour s'unir et former l'arcade palmaire profonde distale. De cette arcade procèdent quatre veines très inégales, deux superficielles, digitales communes II et III qui encadrent les tendons fléchisseurs, et deux profondes, métacarpiennes palmaires II et III, placées contre l'os métacarpien principal.

La veine digitale commune (palmaire) II - ou médiale - est la plus volumineuse. Elle part du bord médial de l'arcade précitée, rejoint au bord médial des tendons fléchisseurs l'artère homonyme, au bord dorsal de laquelle elle se place. Arrivée près du carpe, elle échange avec son homologue latérale une anastomose habituellement double qui constitue l'arcade palmaire profonde (proximale), au-delà de laquelle elle se continue par la veine céphalique.

La veine digitale commune (palmaire) III - ou latérale - est moins grosse que la précédente. Elle s'élève comme elle au bord dorsal de l'artère homonyme, qui est grêle ; elle rejoint l'extrémité latérale de l'arcade palmaire profonde, au-delà de laquelle elle se continue par la racine palmaire de la veine médiane.

Les veines métacarpiennes palmaires II et III sont grêles, variables et diversement anastomosées. Elles quittent la partie moyenne de l'arcade palmaire profonde distale, passent entre les branches du muscle interosseux III puis entre ce dernier et l'os métacarpien principal pour rejoindre la partie profonde de l'arcade proximale (Barone, 2011).

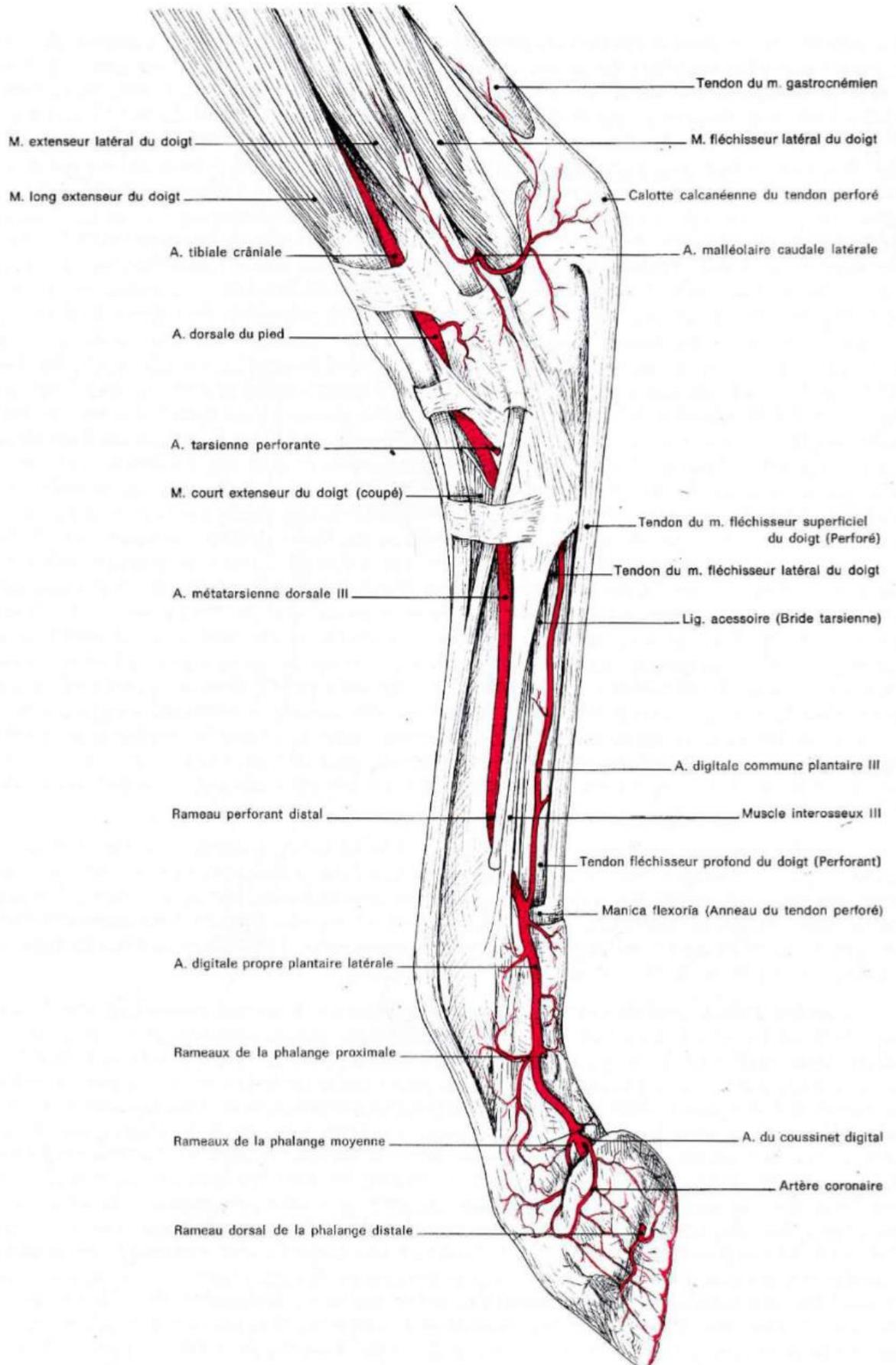
### ***c. Réseau artériel du membre pelvien***

L'artère iliaque externe donne l'artère fémorale qui donne l'artère poplitée. L'artère poplitée donne naissance à l'artère tibiale crâniale et l'artère tibiale caudale.

L'artère tibiale crâniale se prolonge par l'artère dorsale du pied, responsable de la quasi-totalité de l'irrigation du pied. L'artère dorsale du pied donne l'artère tarsienne perforante qui participe à la formation de l'arcade plantaire profonde, et donne aussi l'artère métatarsienne dorsale III. Celle-ci se prolonge distalement au métacarpien IV en un rameau perforant distal. Ce rameau s'insinue entre l'os métacarpien III et la branche latérale du muscle interosseux III, puis se sépare au niveau de la manica flexoria en deux artères digitales propres plantaires. Celles-ci se comportent comme les digitales propres du membre thoracique.

L'artère tibiale caudale donne deux artères plantaires qui elles-mêmes se prolongent en rameaux profonds et superficiels : les rameaux profonds s'anastomosent entre eux et avec l'artère tarsienne perforante pour créer l'arcade plantaire profonde, qui donne les artères métatarsiennes plantaires II et III. L'artère métatarsienne II est médiale, nourrit les tendons fléchisseurs du doigt et la peau. L'artère métatarsienne III est latérale et frêle, et se termine sur le rameau perforant distal. Les rameaux superficiels donnent les artères digitales communes plantaires II et III.

Figure 17 : Artères du pied du cheval, vue médiale (Barone, 2011).



#### ***d. Réseau veineux du membre pelvien***

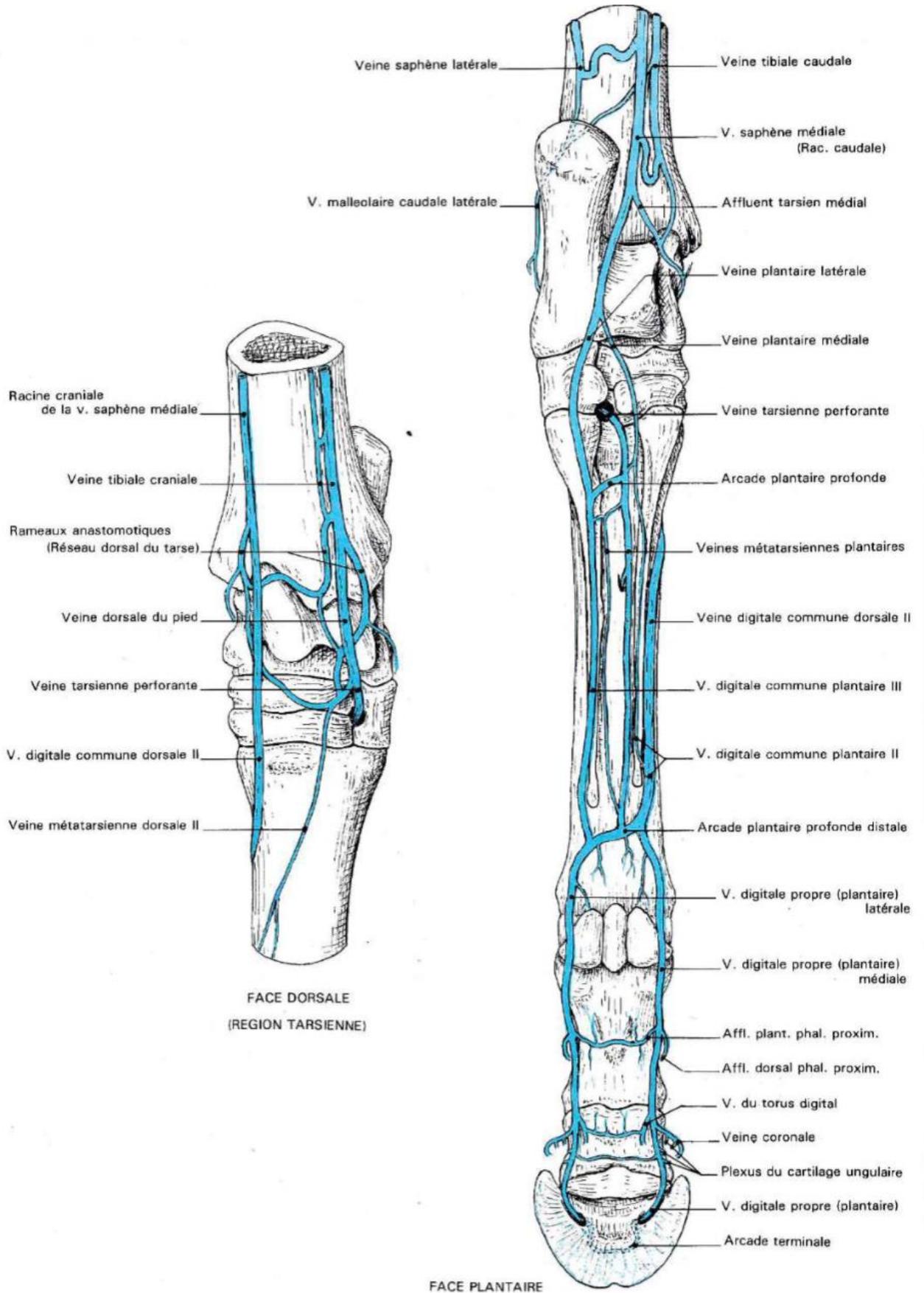
La disposition veineuse de la portion terminale du pied est identique à celle de la main. Les veines digitales propres dorsales font défaut et sont suppléées par les affluents dorsaux des veines digitales propres plantaires, médiale et latérale. Celles-ci ont, avec les artères et les nerfs du doigt, les mêmes rapports et s'unissent entre la partie distale de l'os métatarsien III et le muscle interosseux III en une arcade plantaire profonde distale d'où partent les autres veines du pied.

La face dorsale du pied anatomique ne possède qu'une veine digitale commune dorsale et une veine métatarsienne dorsale.

La veine digitale commune dorsale II est très forte et sa partie distale est confondue sur un court trajet avec son homologue plantaire, beaucoup plus faible. Elle naît de l'arcade plantaire profonde distale, où elle semble prolonger la veine digitale propre médiale. Elle s'élève au bord correspondant du muscle interosseux III et se sépare ensuite de son homologue plantaire. Au niveau du tarse, elle se continue par la racine crâniale de la veine saphène médiale. La veine métatarsienne dorsale II rassemble au dos de l'os métatarsien principal deux grêles racines qui commencent isolément vers la mi-hauteur de la région. Elle se jette dans la veine tarsienne perforante.

Les veines de la face plantaire sont, au-delà des deux veines digitales propres, deux veines digitales communes et deux métatarsiennes plantaires. La veine digitale commune plantaire II naît avec son homologue dorsale. Beaucoup plus grêle qu'elle, elle monte dorsalement à l'artère au bord médial du tendon du muscle fléchisseur profond du doigt. La veine digitale commune plantaire III, plus grêle encore et parfois absente, occupe une position similaire à la veine digitale commune plantaire II mais du côté latéral. Les veines métatarsiennes plantaires II et III naissent l'une près de l'autre et souvent en commun sur l'arcade plantaire profonde distale. La veine métatarsienne plantaire III est généralement de loin la plus grêle et peut être incomplète ou absente. Toutes deux montent entre l'os métatarsien principal et le muscle interosseux III jusqu'à l'arcade plantaire profonde (Figure 18, Barone, 2011).

Figure 18 : Veines du pied du cheval (Barone, 2011).



## **F. Neurologie**

### ***a. Neurologie du membre thoracique***

Comme les vaisseaux sanguins, les nerfs de la main sont limités en face dorsale et sont suppléés par les nerfs palmaires. Le nerf métacarpien dorsal latéral provenant du rameau dorsal du nerf ulnaire, donne quelques fibres à l'articulation du boulet. Les deux nerfs métacarpiens palmaires latéral et médial issus du nerf ulnaire donnent des fibres pour le périoste et le muscle interosseux III jusqu'au boulet.

Les principaux nerfs sont les nerfs digitaux communs palmaires médial et latéral. Le nerf digital commun palmaire médial est issu de la branche médiale de la division terminale du nerf médian. Il suit l'artère médiane puis l'artère digitale commune palmaire II, puis devient au-dessus du boulet le nerf digital propre palmaire médial. Il donne le long de son trajet des fibres pour les tendons fléchisseurs du doigt et pour la peau.

Le nerf digital commun palmaire latéral naît de l'union d'un rameau latéral du nerf médian et du rameau palmaire du nerf ulnaire. Il s'accole à la veine digitale commune palmaire III et devient le nerf digital propre palmaire latéral.

Chaque nerf digital propre donne un rameau dorsal au-dessus de l'articulation, ce qui marque la limite avec le nerf digital commun. Le nerf occupe le bord palmaire du faisceau vasculo-nerveux. Après avoir émis son rameau dorsal, le nerf digital propre palmaire forme au niveau du boulet un rameau intermédiaire qui vient se placer dorsalement à la veine du même nom ainsi qu'un rameau palmaire qui se prolonge jusqu'au pied en restant positionné palmairement aux vaisseaux sanguins (Figure 19, Barone, 2012).

### ***b. Neurologie du membre pelvien***

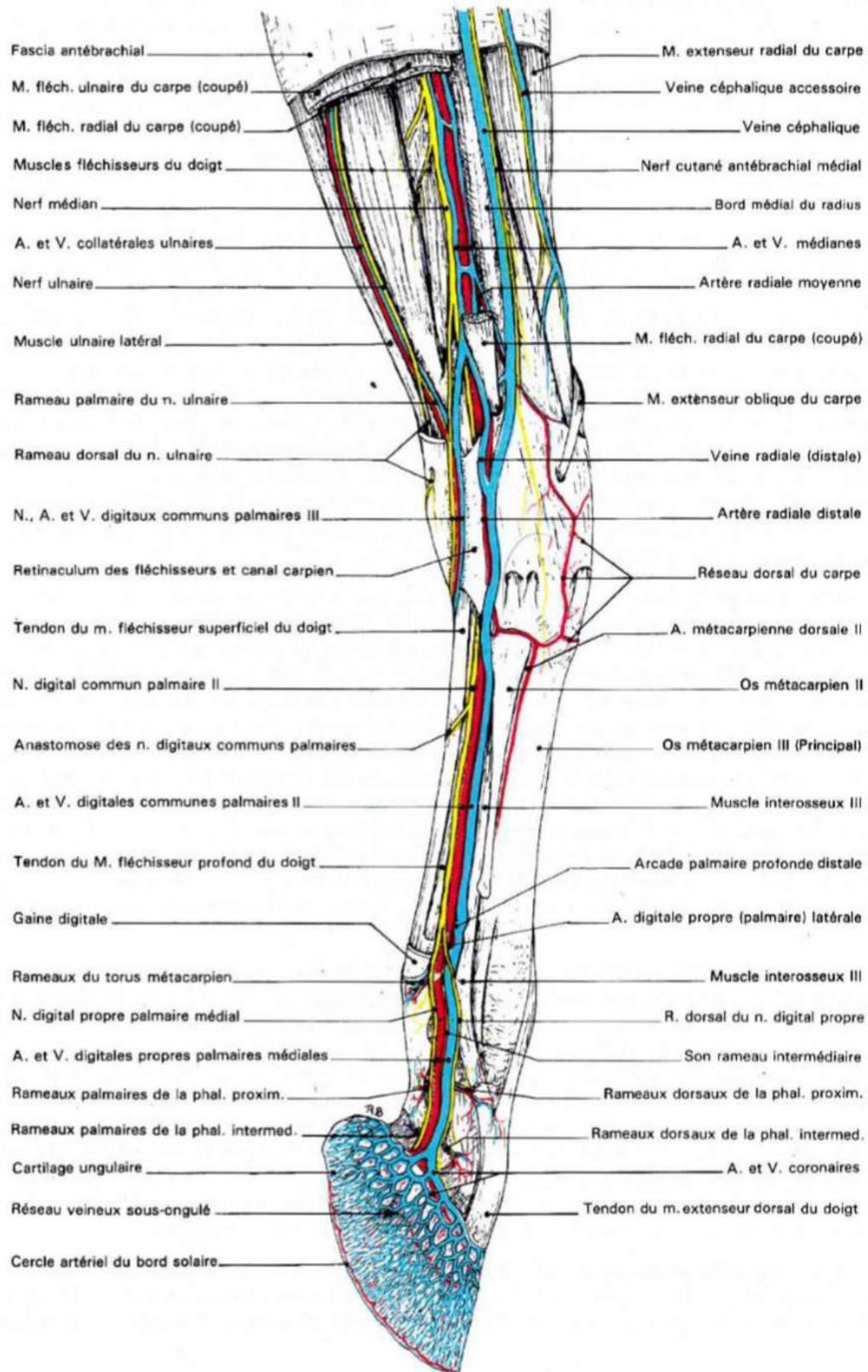
Comme pour le membre thoracique, les nerfs sont vestigiaux en portion dorsale et volumineux en plantaire.

Les nerfs de la face dorsale proviennent du nerf fibulaire profond qui se divise en deux nerfs métatarsiens dorsaux : le nerf métatarsien dorsal II ou médial descend jusqu'en partie distale de l'articulation du boulet pour rejoindre le nerf métatarsien plantaire II. Le nerf métatarsien dorsal III ou latéral accompagne l'artère métatarsienne dorsale III.

Tous les nerfs de la face plantaire proviennent des deux nerfs plantaires qui prolongent le nerf tibial. Le nerf plantaire latéral donne deux branches : le rameau profond, qui donne des fibres à l'insertion proximale du muscle interosseux III puis se divise en deux grêles nerfs métatarsiens plantaires II et III. Son autre branche est le nerf digital commun plantaire III, accompagné en dorsal par l'artère digitale commune plantaire III rapidement rejointe par la veine. En région proximale du boulet, le nerf digital commun plantaire III se divise de la même manière que sur le membre antérieur, en formant un rameau dorsal, un rameau intermédiaire et un rameau plantaire qui prolonge la direction du nerf digital propre plantaire latéral.

Le nerf plantaire médial donne le nerf digital commun plantaire II. Il suit le trajet de l'artère et de la veine homonyme puis se comporte au niveau du boulet comme le nerf digital commun plantaire III (Barone, 2012).

Figure 19 : Rapports anatomiques des nerfs du membre thoracique, vue médiale (Barone, 2011).

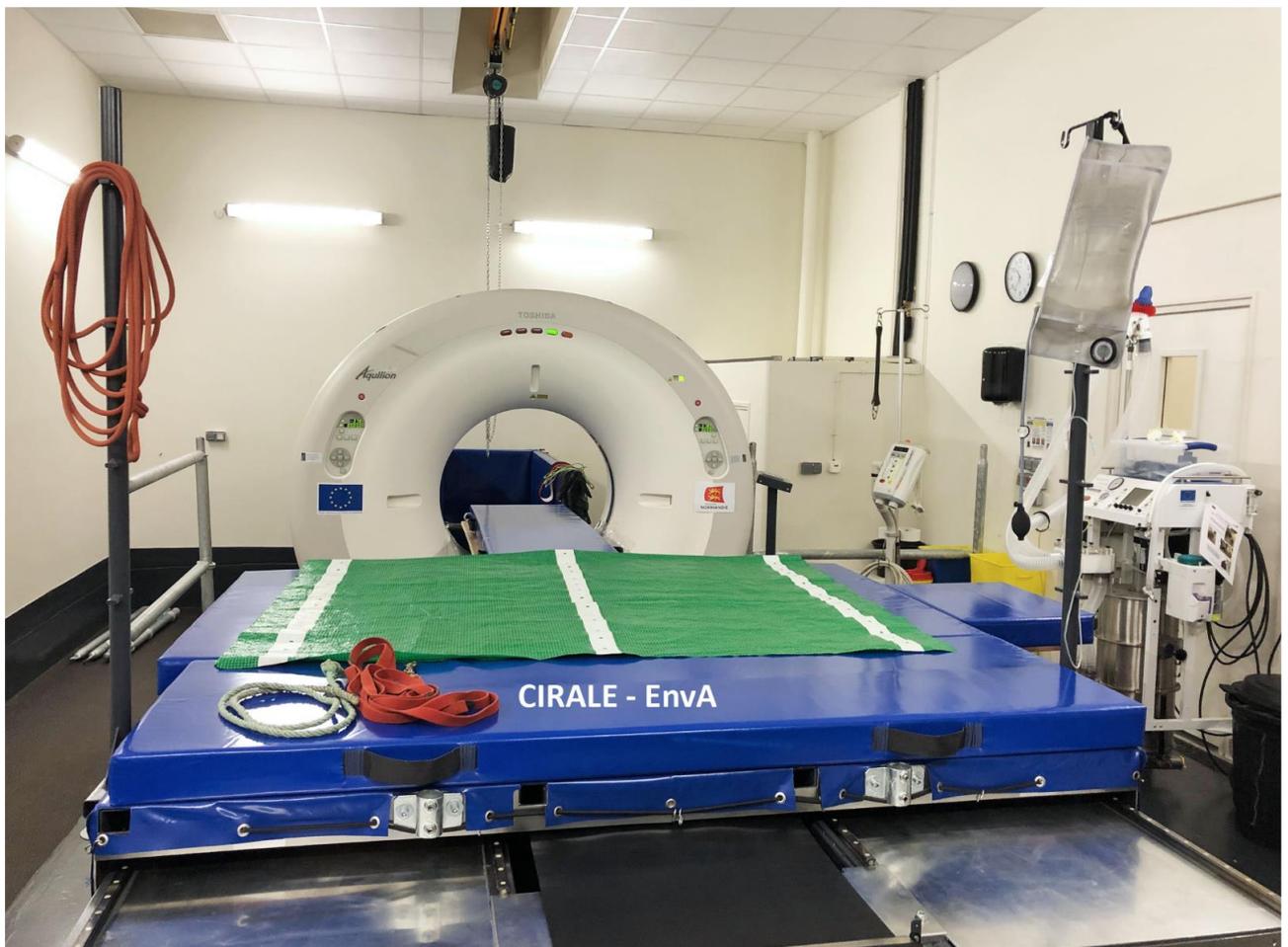


# Deuxième partie : matériel et méthodes

## 1. Instrumentation et acquisition des images

Le scanner utilisé pour acquérir les images se trouve au Centre d'Imagerie et de Recherche sur les Affections Locomotrices Equines (CIRALE). Il s'agit d'un scanner Canon Aquilion Large Bore d'un diamètre patient de 90 cm, équipé d'une table pour les chevaux, motorisée et réglable en hauteur conçue par le CIRALE et réalisée par l'entreprise belge Medical Imagery (Figure 20).

**Figure 20 : Salle du scanner au CIRALE et sa table pour chevaux.**



Les images ont été acquises sur un membre antérieur droit d'une femelle trotteur français de 4 ans, récupéré après son autopsie à Dozulé. Le membre a été scanné du milieu du canon à l'articulation interphalangienne distale. Le membre est sain : le cheval ne présentait pas de boiterie avant son euthanasie et sur les images acquises, un radiologue vétérinaire spécialisé en équine (LA-ECVDI, Pr. F. Audigié) n'a pas identifié de lésions des formations anatomiques sur les images acquises.

Les paramètres d'acquisition étaient les suivants :

- Constantes d'exposition : tension = 120 kV ; intensité = 300 mA ; temps de rotation du tube = 0,5 s ; mAs effective = 218 mAs ; petit foyer du tube radiogène.
- Champ de vue reconstruit : diamètre = 200 mm ; longueur d'acquisition = 300 mm ; collimation = 0.5mm avec 16 détecteurs, vitesse de déplacement de la table (pitch) = lent ; durée d'acquisition 28.8 secondes.

La position du cheval lors de l'examen d'un cas clinique est visible sur la photographie suivante (Figure 21). Le boulet d'intérêt clinique est habituellement placé près de la table. En d'autres termes, le cheval est couché préférentiellement en décubitus latéral gauche pour l'examen d'un boulet antérieur gauche.

**Figure 21 : Table du scanner du CIRALE avec un cheval pour un examen d'imagerie de l'antérieur gauche.**



En plus de l'examen standard, des acquisitions avec injection de produit de contraste ont été réalisées sur ce membre isolé. Une première acquisition d'images a été réalisée après injection de 10 ml (5 ml d'iode et 5 ml de NaCl 0,9%) par voie intra-articulaire, puis après injection de 20 ml supplémentaires en intra-articulaire soit un total de 30 ml de produit de contraste (boulet en flexion, 15 ml d'iode et 15 ml de NaCl 0,9%). En intravasculaire, l'iode 150 mg/ml a été injecté à la vitesse de 2 ml/s pendant toute la durée de l'acquisition.

## **2. Traitement des images et annotations anatomiques**

Les images ont été acquises selon le mode 3D et le mode MPR, auxquels ont été rajoutés un filtre osseux ou un filtre tissus mous. Le mode 3D a été utilisé pour illustrer sous différents angles de vue l'ostéologie du boulet ainsi que les récessus articulaires et les vaisseaux après injection de produit de contraste. Le mode MPR permet de reconstruire les coupes selon les différents plans anatomiques : il y a donc des coupes filtre osseux ou tissus mous frontales, sagittales, et transversales.

Travailler à la fois avec des images 3D et des coupes permet d'avoir une très bonne illustration dans l'espace du boulet, et de connaître les rapports entre les différentes formations anatomiques dans tous les plans possibles.

Les images obtenues sont regroupées selon les différents modes d'acquisition et coupes, puis légendées. Un diaporama est créé pour les rassembler et en faire un atlas anatomique consultable en ligne par les étudiants de l'École Nationale Vétérinaire d'Alfort (EnvA) sur la plateforme Eve.



# Troisième partie : résultats : création d'un support pédagogique d'anatomie

---

Le but de cette thèse était de créer un atlas anatomique regroupant les différentes images tomodensitométriques obtenues et légendées. Cet atlas est proposé en ligne aux étudiants de l'EnvA pour les aider dans la compréhension et l'apprentissage de l'anatomie de la région du boulet du cheval. Deux tests de connaissances avec deux niveaux de difficulté ont aussi été créés et mis en ligne avec le diaporama sur la plateforme Eve pour que les étudiants puissent évaluer leur apprentissage : le premier niveau est dédié aux étudiants du tronc commun alors que le second niveau vise les étudiants A6 Dominante Équine jusqu'aux internes, résidents et pourra être utilisé en formation continue.

## 1. Le diaporama d'images tomodensitométriques annotées

Le premier support pédagogique est un diaporama de 66 clichés légendés. Il illustre l'ostéologie avec des images 3D ainsi que les coupes filtre osseux frontales, sagittales et transversales. Les images en filtre tissus mous illustrent l'arthrologie, la myologie, la neurologie et les rapports entre les différentes formations anatomiques. Les images obtenues après injection de produit de contraste permettent d'illustrer le réseau vasculaire de la région ainsi que les récessus synoviaux.

Les légendes écrites en noir correspondent aux repères anatomiques à connaître pour tout niveau de connaissances tandis que les légendes écrites en bleu correspondent au niveau d'apprentissage d'un étudiant vétérinaire se spécialisant dans l'équine.

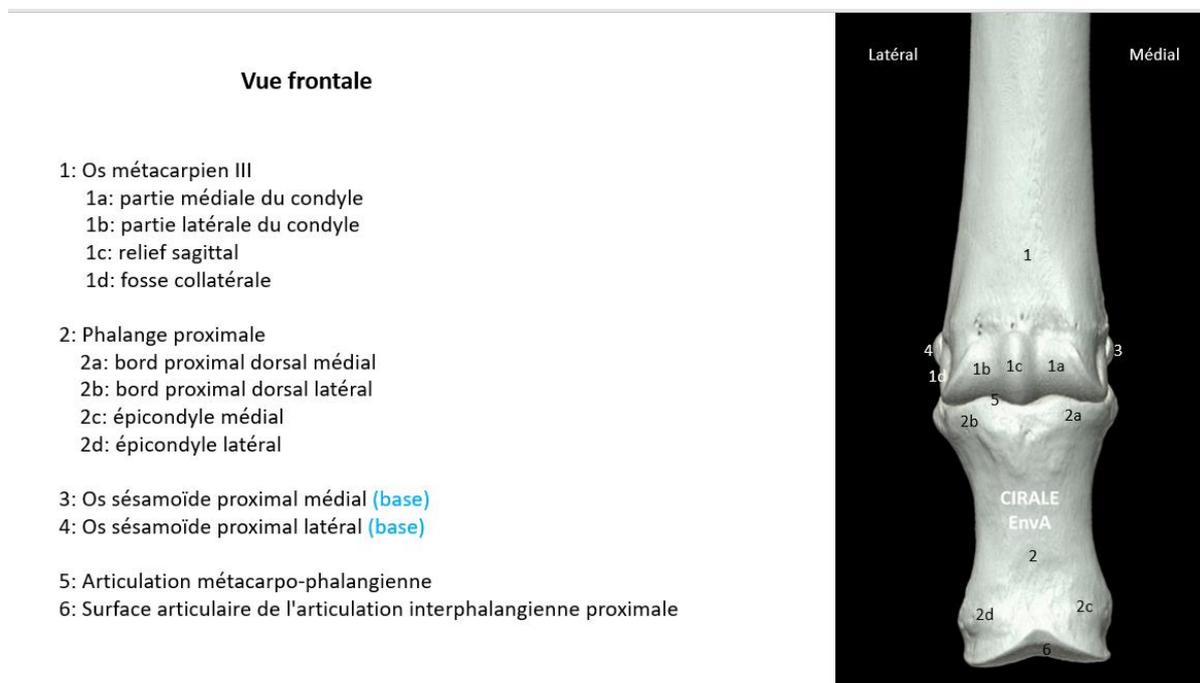
Il est important de souligner la différence de certains termes anatomiques entre la partie « Anatomie de la région du boulet » de la thèse et les légendes présentes dans le diaporama des images tomodensitométriques : on retrouve ces différences pour la partie distale du condyle qui est décrite par le Professeur Barone comme étant constituée de deux condyles, tandis que des ouvrages tels que ceux du Professeur Denoix évoquent un unique condyle. De même, la surface axiale dite facies flexoria et la surface abaxiale dite facies m. interossei de l'os sésamoïde proximal sont nommées respectivement surface des fléchisseurs et surface du muscle interosseux par les ouvrages tels que ceux du Professeur Denoix.

Les étudiants sont confrontés durant leurs cours d'anatomie à l'ENVA à la nomenclature détaillée dans la première partie de la thèse correspondant aux ouvrages du Professeur Barone et la *Nomica Anatomica*. Ceux qui se spécialisent en équine se voient confrontés à la nomenclature utilisée pour légender les images tomodensitométriques, c'est-à-dire celle utilisée au CIRALE et par le Professeur Denoix. Cela leur permet de s'informer des différences qu'il existe dans la nomenclature anatomique du boulet du cheval.

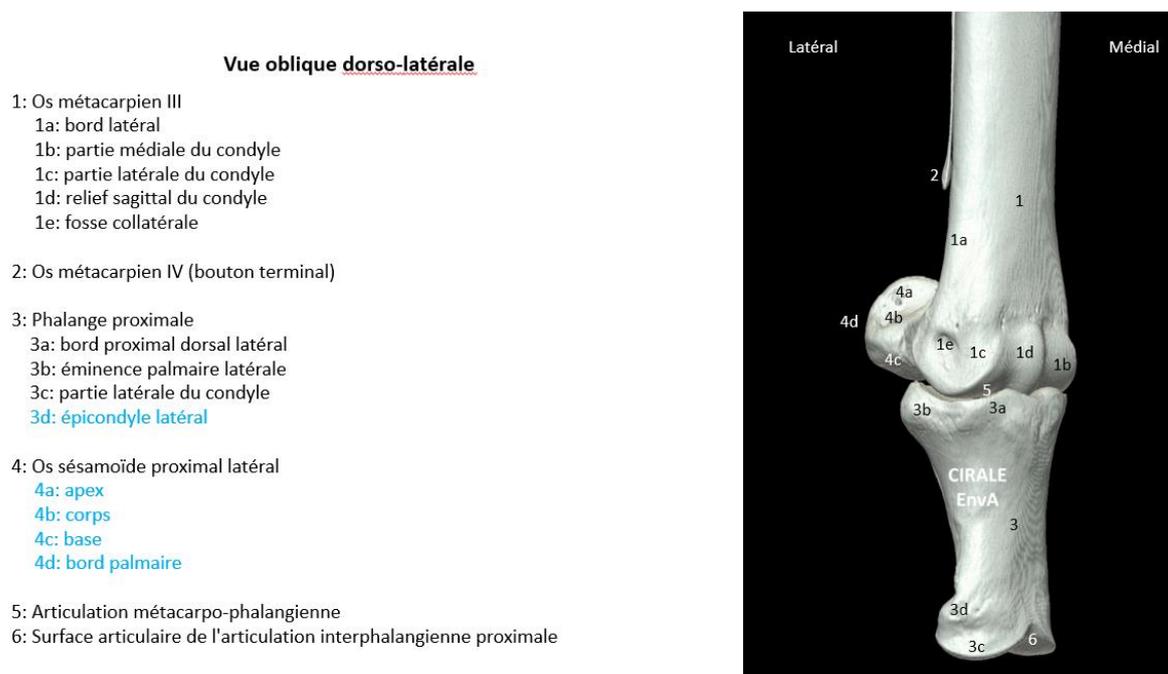
## A. Ostéologie 3D

Ce mode d'acquisition d'images permet une visualisation dans l'espace de l'anatomie osseuse du boulet du cheval (Figure 22, Figure 23, Figure 24).

**Figure 22 : Exemple d'une des diapositives légendées de l'ostéologie du boulet en 3D, vue frontale.**



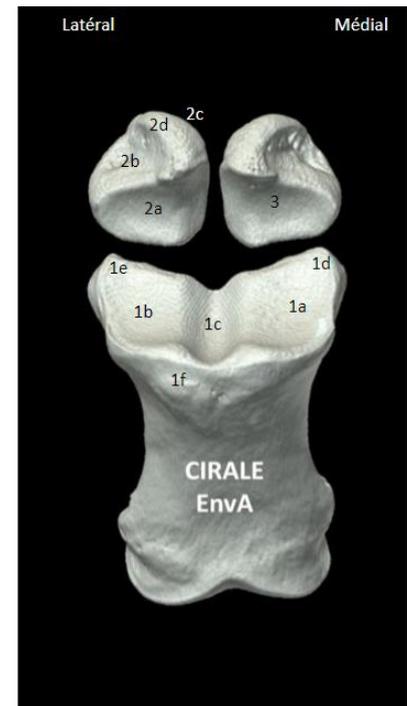
**Figure 23 : Exemple d'une des diapositives légendées de l'ostéologie du boulet en 3D, vue oblique dorsolatérale.**



**Figure 24 : Exemple d'une des diapositives légendées de l'ostéologie du boulet en 3D, vue dorsale après suppression de l'os métacarpien III.**

**Vue dorsale visualisée depuis l'extrémité proximale:  
avec suppression de l'os métacarpien III**

- 1: Phalange proximale
  - 1a: cavité glénoïdale médiale
  - 1b: cavité glénoïdale latérale
  - 1c: gorge sagittale proximale
  - 1d: éminence palmaire médiale
  - 1e: éminence palmaire latérale
  - 1f: relief d'insertion pour le tendon extenseur latéral du doigt
  
- 2: Os sésamoïde proximal latéral
  - 2a: face articulaire
  - 2b: surface du muscle interosseux
  - 2c: surface du fléchisseur
  - 2d: apex
  
- 3: Os sésamoïde proximal médial



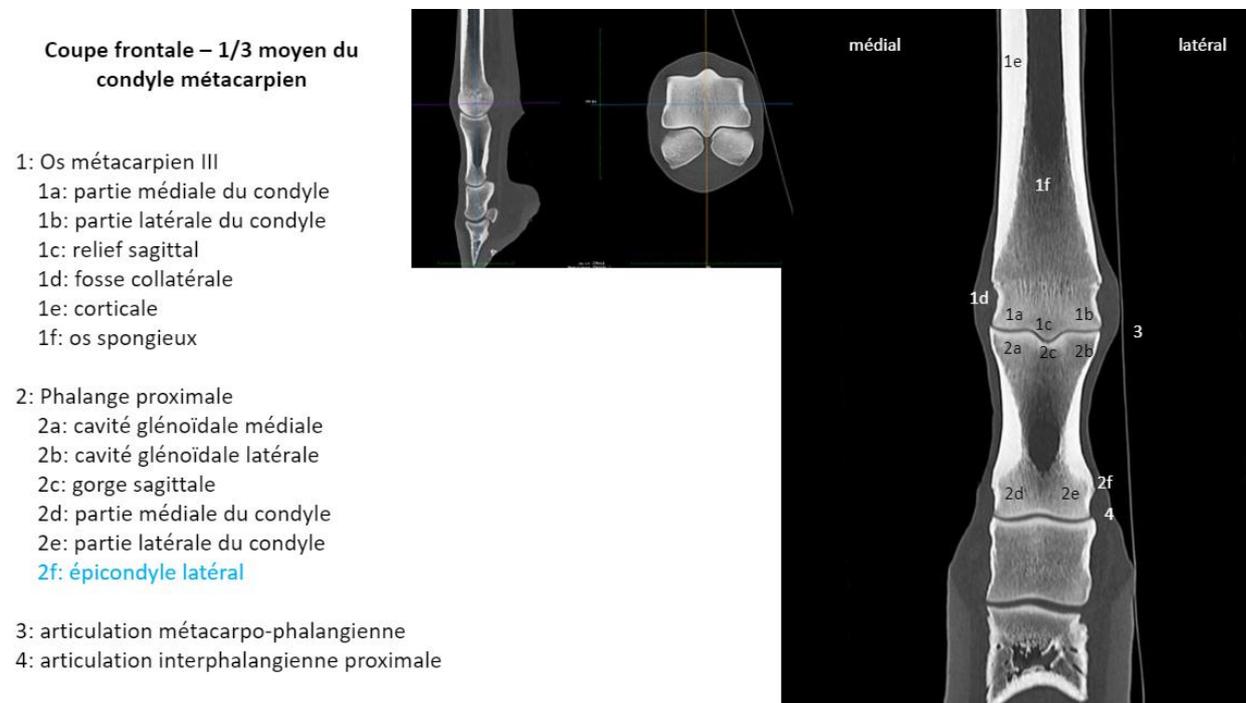
## B. Filtre osseux

Le filtre osseux permet aux étudiants de se focaliser sur les formations osseuses du boulet de cheval, leur surface et leurs rapports entre elles (Figures 25 à 29).

Les deux images supplémentaires à gauche des coupes correspondent aux axes de positionnement de l'image anatomique dans l'espace. Le positionnement des coupes est par ailleurs réalisé par rapport au boulet : en raison de la conformation anatomique du membre et de son positionnement, les coupes n'apparaissent pas symétriques pour les articulations interphalangiennes et les formations anatomiques du pied.

### a. Coupes frontales

**Figure 25 : Exemple d'une des diapositives légendées d'une coupe frontale tissus osseux, tiers moyen du condyle métacarpien.**



**Figure 26 : Exemple d'une des diapositives légendées d'une coupe frontale tissus osseux en région des os sésamoïdes proximaux.**

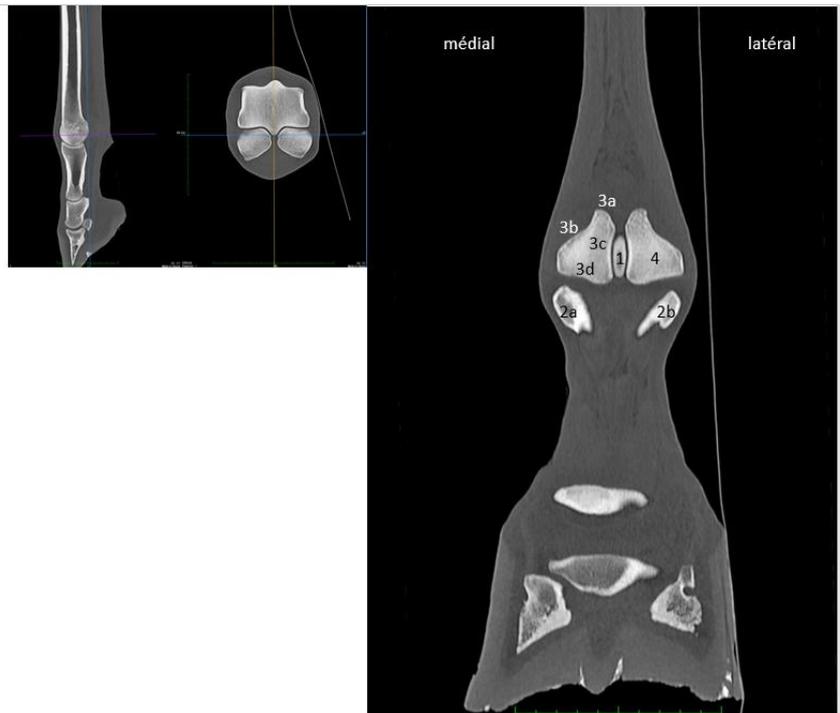
**Coupe frontale – os sésamoïdes proximaux 1**

1: Os métacarpien III: relief sagittal

2: Phalange proximale  
 2a: éminence palmaire médiale  
 2b: éminence palmaire latérale

3: Os sésamoïde proximal médial  
 3a: apex  
 3b: surface du muscle interosseux  
 3c: corps  
 3d: base

4: Os sésamoïde proximal latéral



**b. Coupes sagittales**

**Figure 27 : Exemple d'une des diapositives légendées d'une coupe parasagittale tissus osseux.**

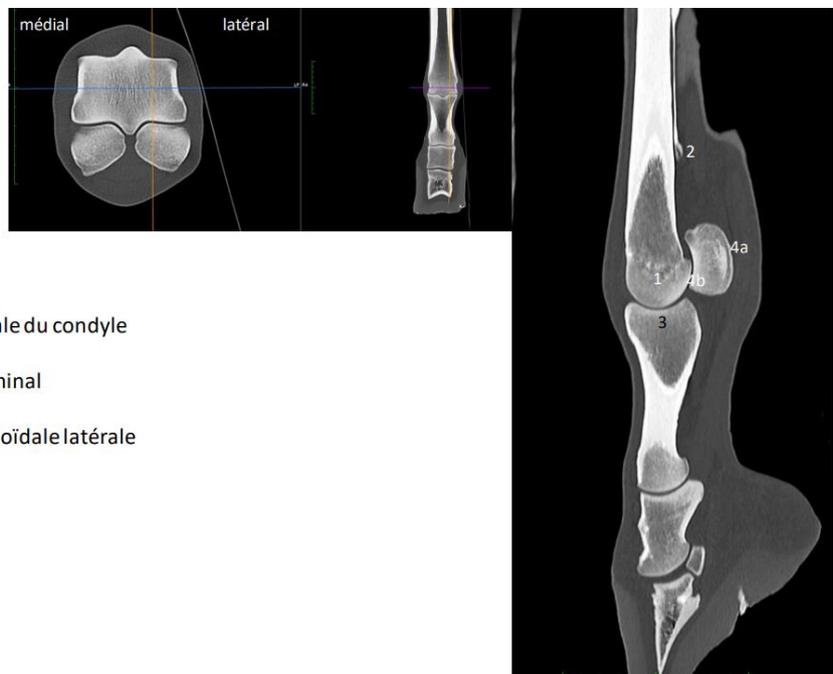
**Coupe parasagittale 3 latérale**

1: Os métacarpien III: partie latérale du condyle

2: Os métacarpien IV: bouton terminal

3: Phalange proximale: cavité glénoïdale latérale

4: Os sésamoïde proximal latéral  
 4a: surface du fléchisseur  
 4b: face articulaire

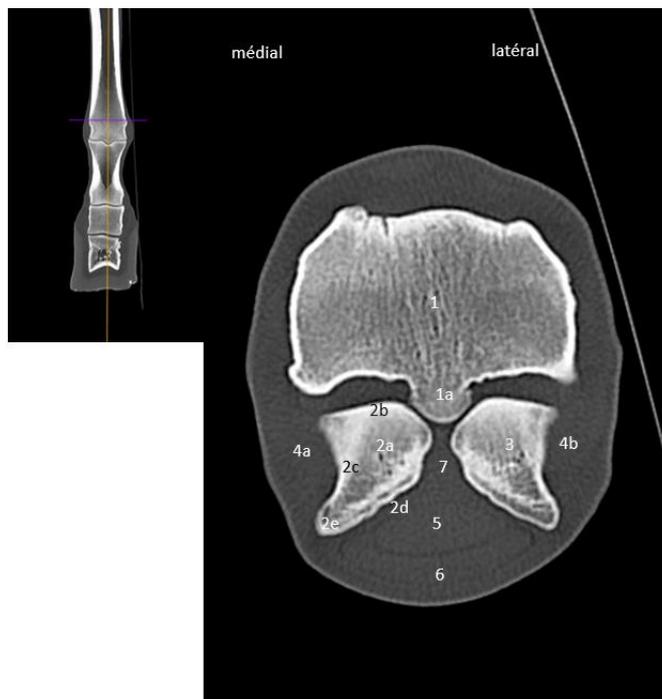


### c. Coupes transversales

**Figure 28 : Exemple d'une des diapositives légendées d'une coupe transversale tissus osseux en région physaire.**

#### Canon: région physaire

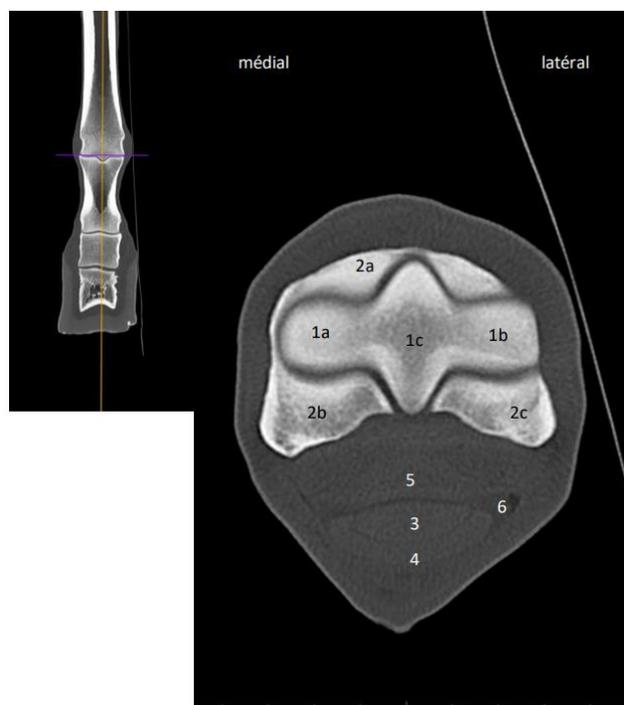
- 1: Os métacarpien III
  - 1a: relief sagittal
- 2: Os sésamoïde proximal médial
  - 2a: corps
  - 2b: face articulaire
  - 2c: surface du muscle interosseux
  - 2d: surface du fléchisseur
  - 2e: bord palmaire
- 3: Os sésamoïde proximal latéral
- 4: Muscle interosseux III
  - 4a: branche médiale
  - 4b: branche latérale
- 5: Tendon fléchisseur profond du doigt
- 6: Tendon fléchisseur superficiel du doigt
- 7: Ligament palmaire



**Figure 29 : Exemple d'une des diapositives légendées d'une coupe transversale tissus osseux en région de l'articulation métacarpo-phalangienne.**

#### Articulation métacarpo-phalangienne 1

- 1: Os métacarpien III
  - 1a: partie médiale du condyle
  - 1b: partie latérale du condyle
  - 1c: relief sagittal du condyle
- 2: Phalange proximale
  - 2a: bord dorsal
  - 2b: éminence palmaire médiale
  - 2c: éminence palmaire latérale
- 3: Tendon fléchisseur profond du doigt
- 4: Tendon fléchisseur superficiel du doigt
- 5: Ligament sésamoïdien droit
- 6: Gaine digitale

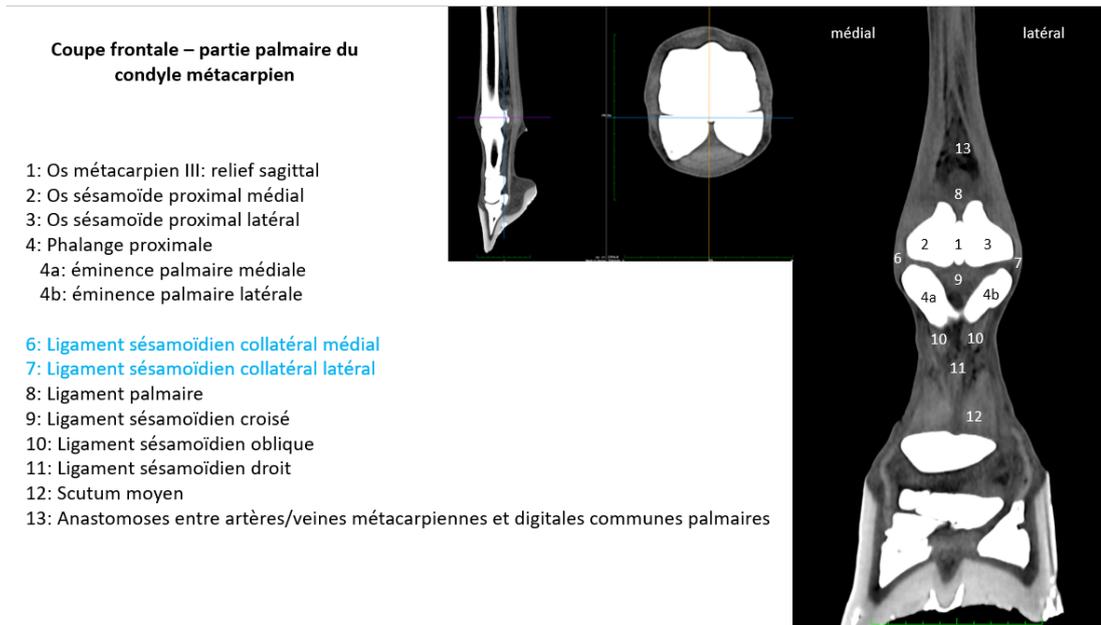


### C. Filtre tissus mous

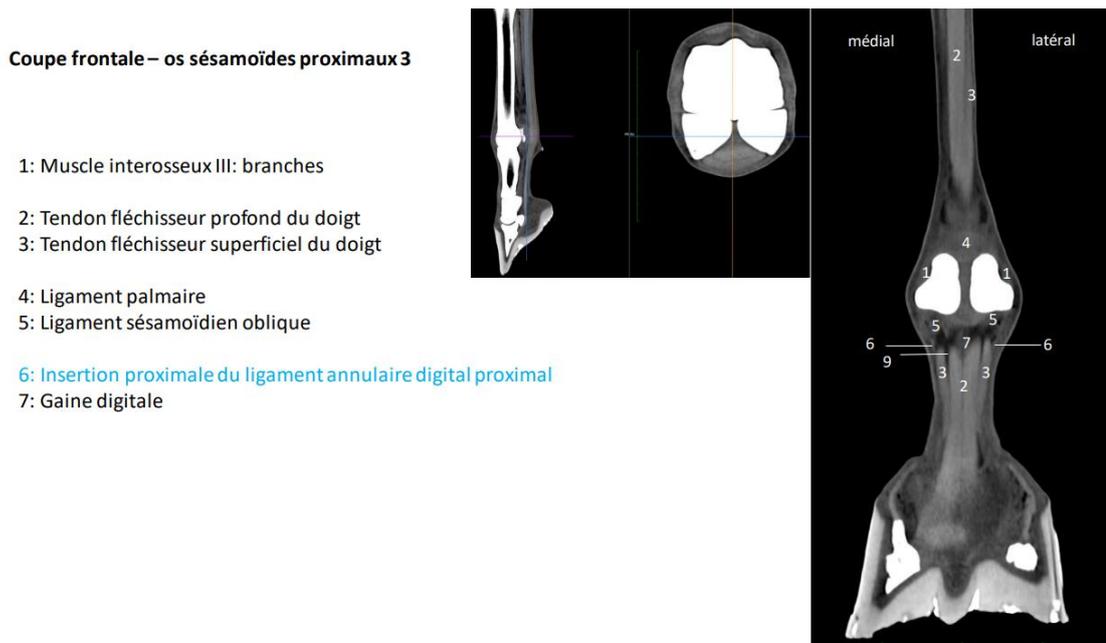
Le filtre tissus mous permet de visualiser les formations anatomiques tendineuses, ligamentaires et articulaires du boulet du cheval, ainsi que les rapports entre elles et avec les os (Figures 30 à 34). Le fenêtrage de l'image (réglage de la luminosité et du contraste) est réglé de façon à mettre en évidence les différents tissus mous. Inversement ce réglage aboutit à une saturation des formations osseuses qui deviennent entièrement blanches.

#### a. Coupes frontales

**Figure 30 : Exemple d'une des diapositives légendées d'une coupe frontale tissus mous en région palmaire du condyle métacarpien.**

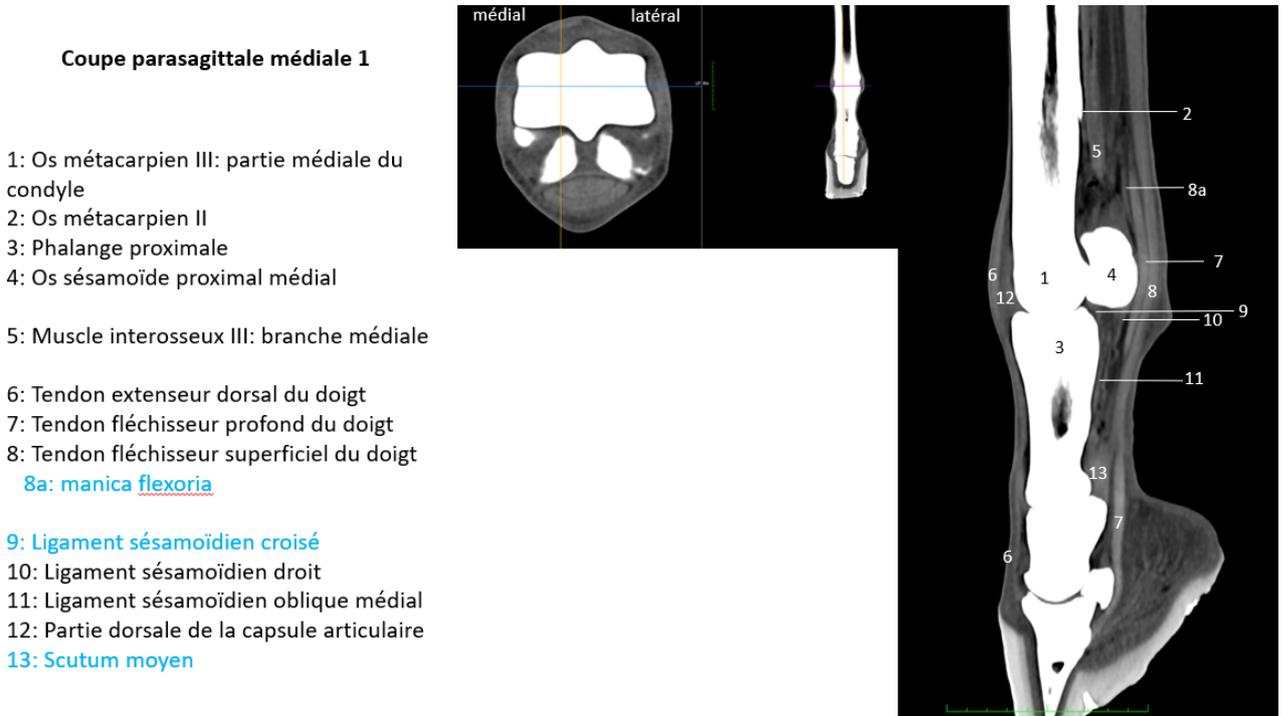


**Figure 31 : Exemple d'une des diapositives légendées d'une coupe frontale tissus mous en région des os sésamoïdes proximaux.**



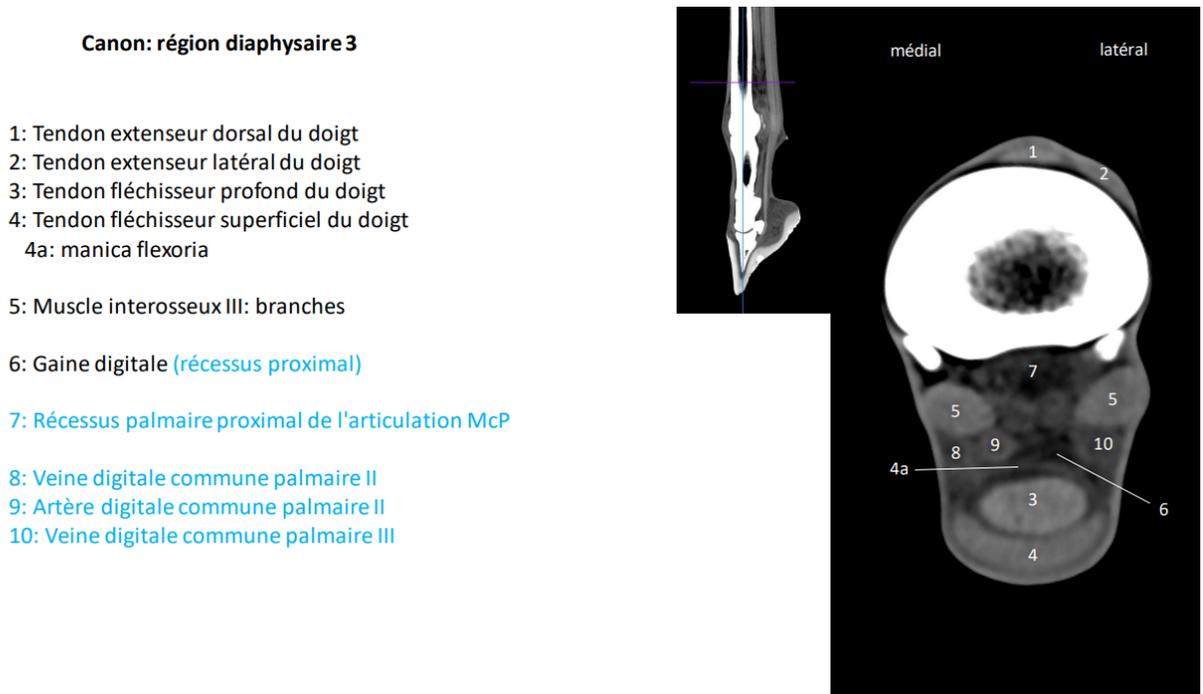
### b. Coupes sagittales

Figure 32 : Exemple d'une des diapositives légendées en coupe parasagittale filtre tissus mous.



### c. Coupes transversales

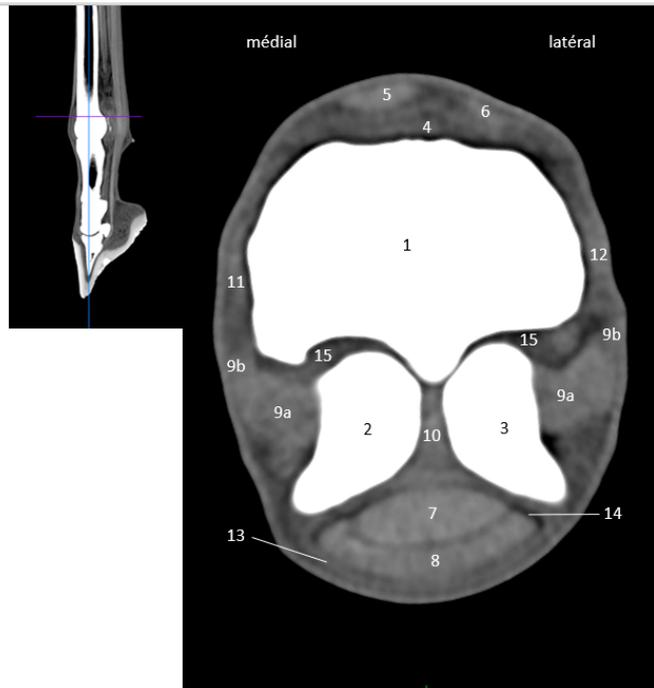
Figure 33 : Exemple d'une des diapositives légendées d'une coupe transversale tissus mous en région diaphysaire.



**Figure 34 : Exemple d'une des diapositives légendées d'une coupe transversale tissus mous en région du condyle métacarpien.**

**Canon: condyle métacarpien 1**

- 1: Os métacarpien III
- 2: Os sésamoïde proximal médial
- 3: Os sésamoïde proximal latéral
  
- 4: Partie dorsale de la capsule de l'articulation McP
- 5: Tendon extenseur dorsal du doigt
- 6: Tendon extenseur latéral du doigt
- 7: Tendon fléchisseur profond du doigt
- 8: Tendon fléchisseur superficiel du doigt
  
- 9: Muscle interosseux III
  - 9a: branches
  - 9b: brides du muscle interosseux III pour l'extenseur
  
- 10: Ligament palmaire
- 11: Ligament collatéral médial de l'articulation McP
- 12: Ligament collatéral latéral de l'articulation McP
- 13: Ligament annulaire palmaire
  
- 14: Gaine digitale
- 15: Récessus palmaire proximal de l'articulation McP



## D. Techniques spéciales

### a. Injections intra-articulaires

Les images obtenues après injection intra-articulaire de produit de contraste permettent de visualiser aisément les récessus articulaires de l'articulation du boulet du cheval (Figure 35, Figure 36).

**Figure 35 : Exemple d'une des diapositives légendées d'une modélisation 3D en vue oblique palmaro-dorsale, après injection intra-articulaire (10 ml de produit de contraste).**

- Vue oblique palmaro-dorsale**
- 1: Récessus palmaire proximal de la synoviale McP
  - 2: Récessus palmaire distal de la synoviale McP
  - 3: Récessus dorsal de la synoviale McP



**Figure 36 : Exemple d'une des diapositives légendées d'une coupe sagittale après injection de produit de contraste en intra-articulaire (30 ml de produit de contraste).**

- Coupe sagittale**
- 1: Récessus dorsal de la synoviale McP
  - 2: Récessus palmaire proximal de la synoviale McP
  - 3: Récessus palmaire distal de la synoviale McP



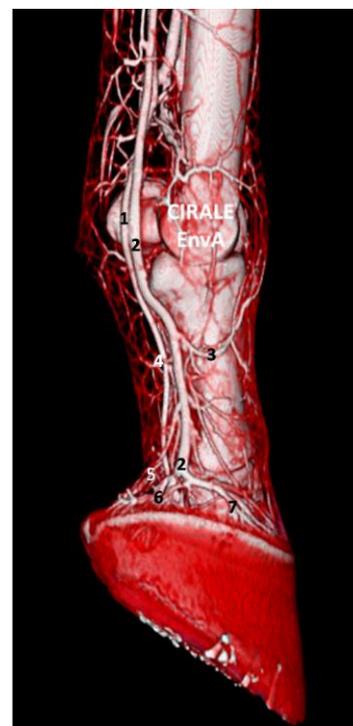
### ***b. Injections intravasculaires***

Les images obtenues après injection de produit de contraste par voie intra-artérielle par cathétérisme de l'artère médiane sous contrôle échographique permettent de visualiser le réseau artérioveineux du boulet du cheval (Figure 37, Figure 38).

**Figure 37 : Exemple d'une des diapositives légendées illustrant les vaisseaux sanguins injectés (2 ml/s) en modélisation 3D.**

#### **Vue médiale (phase artério-veineuse)**

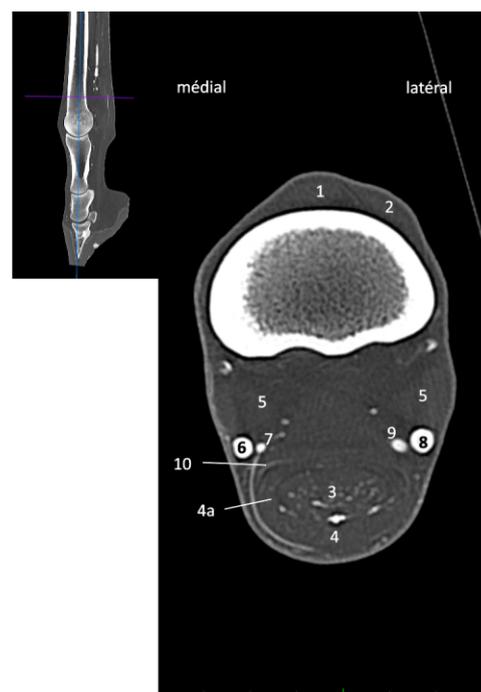
- 1: Artère digitale commune palmaire latérale
- 2: veine digitale propre palmaire latérale
- 3: Rameaux dorsaux de la phalange proximale
- 4: Rameaux palmaires de la phalange proximale
- 5: Rameaux du torus digital
- 6: Plexus unguulaire superficiel
- 7: Artère et veine coronaires



**Figure 38 : Exemple d'une des diapositives légendées illustrant les vaisseaux sanguins injectés (2 ml/s) en coupe transversale.**

#### **Coupe transversale - métaphysaire**

- 1: Tendon extenseur dorsal du doigt
- 2: Tendon extenseur latéral du doigt
- 3: Tendon fléchisseur profond du doigt
- 4: Tendon fléchisseur superficiel du doigt
- 4a: manica flexoria
- 5: Muscle interosseux III: branches
- 6: Veine digitale propre palmaire II
- 7: Artère digitale propre palmaire II
- 8: Veine digitale propre palmaire III
- 9: Artère digitale propre palmaire III
- 10: Membrane synoviale de la gaine digitale



## 2. Le contrôle de connaissances sous forme de quizz

À partir des images obtenues par le scanner, un test d'évaluation a été créé à l'intention des élèves de l'EnvA. Il permet aux étudiants d'estimer leur niveau de connaissance quant à l'anatomie des os, tissus mous et réseau vasculaire de la région du boulet, ainsi que leur aisance à étudier des clichés de tomodensitométrie.

Il y a deux niveaux, l'un pour les élèves du tronc commun, et l'autre, plus difficile, pour les élèves en spécialisation équine (A6 ou internat). Plusieurs types de questions ont été choisis pour varier les modes d'interrogation, mais celles-ci sont basées pour la plupart sur un cliché tomodensitométrique. Sont proposées des annotations d'images, des questions à réponse courte, ou des réponses à choix multiple (Figure 39, Figure 40).

Ces deux supports pédagogiques ont ensuite été mis en ligne sur Eve, plateforme pour l'enseignement des étudiants de l'EnvA, avec l'aide de la direction des systèmes informatiques de l'école. Ces supports pourront ainsi être intégrés dans les modules d'enseignement d'anatomie.

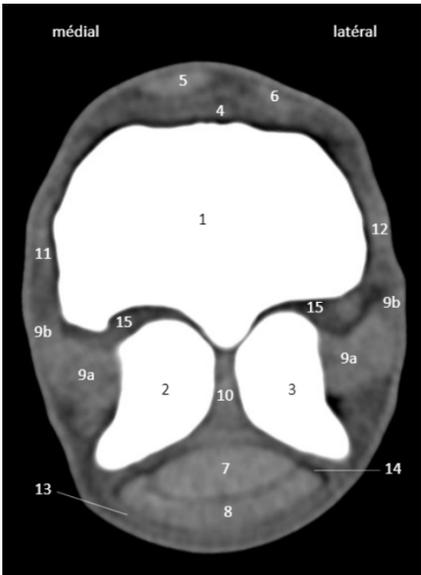
Pour accéder à ces ressources, il faut se connecter sur Eve et deux accès seront possibles :

- En suivant le chemin : Formation initiale > Thèse de doctorat vétérinaire > Thèses multimédias > Imagerie du scanner du boulet du cheval (Figure 41).
- En cliquant sur le lien qui se trouve dans l'UC (Unité de Compétence) concernée par l'utilisation de ces ressources.

**Figure 39 : Exemple d'une des questions du test de connaissances du tronc commun.**

Question 4 Pas encore répondu Noté sur 1 Marquer la question Modifier la question

Déplacez les repères anatomiques sur les numéros de l'image correspondants



médial latéral

1 2 3 4 5 6 7 8 9a 9b 10 11 12 13 14 15

Tendon fléchisseur superficiel du doigt Ligament annulaire palmaire Gaine digitale Ligament collatéral médial de l'articulation Tendon fléchisseur profond du doigt

Figure 40 : Exemple d'une des questions du test de connaissances pour les A6 et internes.

Accueil > Cours > Espace Formation initiale > Thèses > Les thèses multimédia > Thèses en cours > scanner du boulet du cheval

Question 3 Pas encore répondu Noté sur 1,00 Marquer la question Modifier la question

Appariez les numéros aux repères anatomiques correspondants



5 Choisir...  
8a Choisir...  
13 Choisir...

Figure 41 : Ressources disponibles pour un étudiant se rendant sur la page Eve consacrée à la thèse (ici visualisées avec le mode édition de Eve).

Instruction : un clic sur le titre de la section affiche ou masque cette section

Supports pédagogiques

Diaporama d'images tomodensitométriques du boulet du cheval

Test de connaissance

Contrôle de connaissances boulet du cheval niveau tronc commun

Contrôle de connaissances niveau A6 et internat équins



# Quatrième partie : discussion sur les résultats et applications cliniques

---

## 1. Analyse du travail effectué

### *a. Réalisation des images*

Les images ont été réalisées sur le membre isolé d'un cheval. Le membre a été placé de manière similaire au positionnement pratiqué sur cheval vivant, les images acquises sont donc représentatives de ce qui est obtenu pendant un examen scanner. De plus, travailler sur des tissus morts n'induit pratiquement pas de différence avec un examen sur tissus vivants car le flux sanguin ne provoque pas d'artefact en tomodensitométrie. Cependant, la taille des vaisseaux est modifiée, l'aspect de ceux-ci n'est donc pas comparable à ce qui est obtenu lors d'un examen in vivo. Leur topographie reste par ailleurs identique.

L'un des autres points négatifs est qu'un seul membre a été étudié, ce qui ne permet pas d'apprécier les variations anatomiques entre, d'une part, le boulet antérieur et le boulet postérieur, et d'autre part, au sein de l'espèce équine.

Le dernier point discutable concerne l'injection des synoviales : cet acte a distendu les récessus, les images obtenues ne sont donc pas totalement physiologiques mais cela correspond aux pratiques cliniques. L'acquisition scanner réalisée avant l'injection de contraste sert de référence et permet d'évaluer l'état de distension des synoviales articulaires et de la gaine digitale avant l'injection du produit de contraste iodé.

### *b. Mise en place d'un contenu pédagogique sur la plateforme Eve et intérêt pédagogique*

Cette thèse est pour l'instant un outil d'apprentissage facultatif mis à disposition de toutes les promotions de l'EnvA. La technique d'imagerie par tomodensitométrie est évoquée mais n'est pas détaillée dans les cours d'imagerie dispensés à l'école. Les images obtenues vont permettre aux étudiants de se familiariser avec cette technique d'imagerie de plus en plus répandue et de travailler leur anatomie. L'apprentissage est facilité par les vues 3D et leur rendu volumique. Les coupes scanner dans les 3 directions de l'espace devraient permettre aux étudiants d'avoir une réelle conception 3D de l'anatomie par rapport aux simples figures classiquement présentées dans les livres et photocopiés d'anatomie. Une piste d'amélioration serait la création de films présentant les structures obtenues en 3D en rotation dans l'espace, ou un logiciel permettant la manipulation de celles-ci dans l'espace.

Créer un questionnaire sur Eve a été relativement intuitif. Les modes de questions choisis sont les plus simples à mettre en place et permettent de bien cibler les questions.

Le choix de présenter deux niveaux d'auto-évaluation permet aux étudiants des premières années de se concentrer sur leurs acquis en anatomie générale, et aux autres qui veulent se spécialiser en équine de s'évaluer sur l'anatomie des formations anatomiques plus complexes.

Ces questionnaires ne sont pas reliés aux exigences et objectifs d'apprentissages définis dans les unités de compétences des cours d'anatomie ou de pathologie locomotrice des équidés, mais permettent d'avoir un retour sur l'état des connaissances après la lecture du diaporama d'images légendées et de la thèse.

Le travail de cette thèse mériterait d'être évalué par les étudiants pour être amélioré. Il faudrait comparer les connaissances sur l'anatomie du boulet du cheval de deux groupes d'étudiants, l'un ayant utilisé les ressources de cette thèse pour apprendre l'anatomie, l'autre groupe n'y ayant pas accès.

## **2. Application clinique de la tomодensitométrie du boulet du cheval**

### **A. Qualité de différenciation des formations anatomiques**

La plupart des tissus composant le boulet du cheval sont très bien identifiables avec la tomодensitométrie, mais certaines formations anatomiques ayant la même densité restent difficiles à isoler : les travaux de K.Vanderperren et al. (2008) et ceux de K. Vanderperren et H. Bergman (2011) montre qu'il est difficile de reconnaître les parties superficielles et profondes des ligaments collatéraux, les ligaments sésamoïdiens distaux, la distinction entre les ligaments sésamoïdiens collatéraux et la partie superficielle des ligaments collatéraux.

### **B. Comparaison avec la radiographie**

La tomодensitométrie est plus précise que la radiographie pour mettre en évidence les affections osseuses du boulet. Elle permet aussi d'avoir une vue en trois dimensions des lésions, ce qui est très utile pour la prise en charge médicale, en particulier des fractures. La tomодensitométrie permet aussi d'étudier les tissus mous, vasculaires et nerveux du boulet, ce qui est impossible avec la radiographie. La technique est cependant beaucoup plus difficile et onéreuse à mettre en place que celle de la radiographie.

L'étude de J. Morgan et al. (2006) compare les résultats des examens radiographiques et de tomодensitométrie pour le diagnostic de fracture du boulet : les résultats sont équivalents pour diagnostiquer les fractures du métacarpien/tarsien III et de la diaphyse de la phalange proximale. La tomодensitométrie est supérieure à la radiographie pour les fissures et les atteintes du cartilage ainsi que les fractures des os sésamoïdes proximaux. Les deux techniques présentent des résultats plus limités pour les fractures palmaires/plantaires de la phalange proximale et les fissures coalescentes de l'os sous-chondral des os métacarpiens/tarsiens.

### **C. Comparaison avec l'IRM**

Les avantages de la tomодensitométrie par rapport à l'IRM sont une meilleure qualité des images osseuses et un temps d'exploration beaucoup plus court. Selon l'étude de K.Vanderperren et al. (2008) l'IRM présente de meilleurs résultats pour l'évaluation des tissus mous et les changements métaboliques de l'os sous-chondral telles que les lésions liquidiennes de cet os dénommées classiquement lésions de type œdème osseux.

Certaines études nuancent les bénéfices de l'IRM par rapport à la tomодensitométrie pour les régions articulaires. L'étude de F.Hontoir et al. (2014) compare la sensibilité et la spécificité de

l'IRM contre la tomodensitométrie articulaire après injection intra-articulaire de produit de contraste pour mettre en évidence des lésions de l'articulation : les résultats sont en faveur de la tomodensitométrie, avec une sensibilité de 0,82 et une spécificité de 0,96 pour la tomodensitométrie contre une sensibilité de 0,41 et une spécificité de 0,93 pour l'IRM. L'étude ajoute que l'IRM reste supérieure pour l'évaluation des tissus mous de l'articulation. Les défauts de cartilage visibles au scanner n'ont pas toujours de conséquences cliniques significatives mais l'avenir est dans le suivi longitudinal des articulations comme il est fait en humaine.

L'étude de A. Jones et al. (2019) s'intéresse à la sensibilité de la tomodensitométrie dans le diagnostic des tendinopathies. Les résultats montrent que la tomodensitométrie a détecté toutes les tendinopathies détectées par l'IRM. L'étude souligne aussi tous les avantages de gain de temps et de précision que la tomodensitométrie a face à l'IRM. Néanmoins, les résultats de cette étude sont à moduler par le fait que l'IRM peut se réaliser facilement avec une machine dédiée sur cheval debout tranquilisé alors qu'aujourd'hui la réalisation d'un scanner de la région du boulet sur cheval debout tranquilisé reste à valider dans ses capacités diagnostiques et seul de rares sites en Europe sont équipés aujourd'hui pour effectuer ce type d'examen.

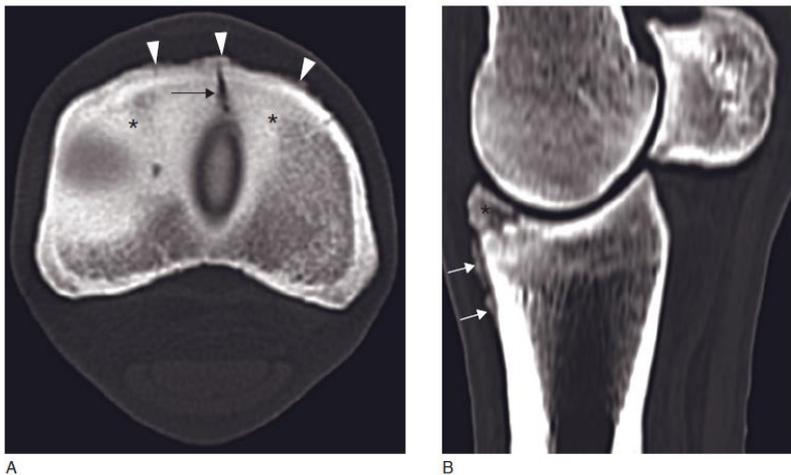
Pour finir, la technique de tomodensitométrie contrairement à l'IRM, ne reflète jamais l'œdème osseux, et n'offre ainsi aucune information de datation de la lésion. L'inflammation osseuse n'est donc pas visible sur les images de scanner.

## **D. Tomodensitométrie et affections ostéoarticulaires**

### ***a. Tissus osseux et tissus cartilagineux***

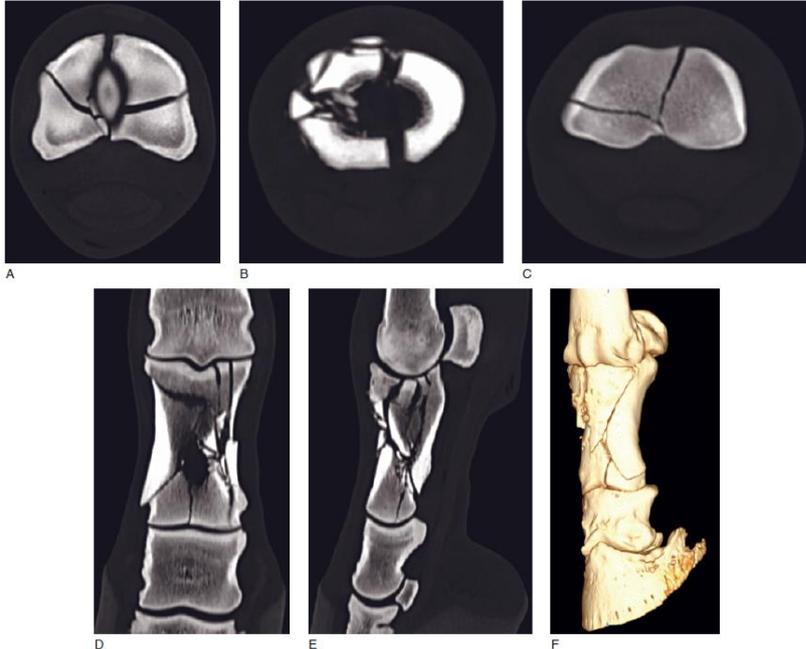
Le chapitre sur les fractures de H. Bergman et J. Saunders (2011) dans *Veterinary Computed Tomography* indique que la tomodensitométrie permet de visualiser des lésions osseuses invisibles avec les autres techniques de diagnostic, comme les fractures subtiles, les fissures, ou certaines lésions endochondrales. De plus, elle permet de mieux comprendre les fractures comminutives en ayant le pouvoir de les visualiser en 3D et de vérifier si besoin l'état du système vasculaire à proximité de la fracture, ce qui a un intérêt dans le pronostic. L'étude a aussi jugé que la tomodensitométrie était très utile pour le diagnostic des fractures de Salter Harris. La tomodensitométrie permet de définir une possible atteinte intra-articulaire, et donner des axes de résolution chirurgicale (Figures 42 à Figure 45).

**Figure 42 : Images tomodensitométriques d'une fissure et de lésions sous-chondrales de la phalange proximale. (Saunders J., Bergman H., 2011).**

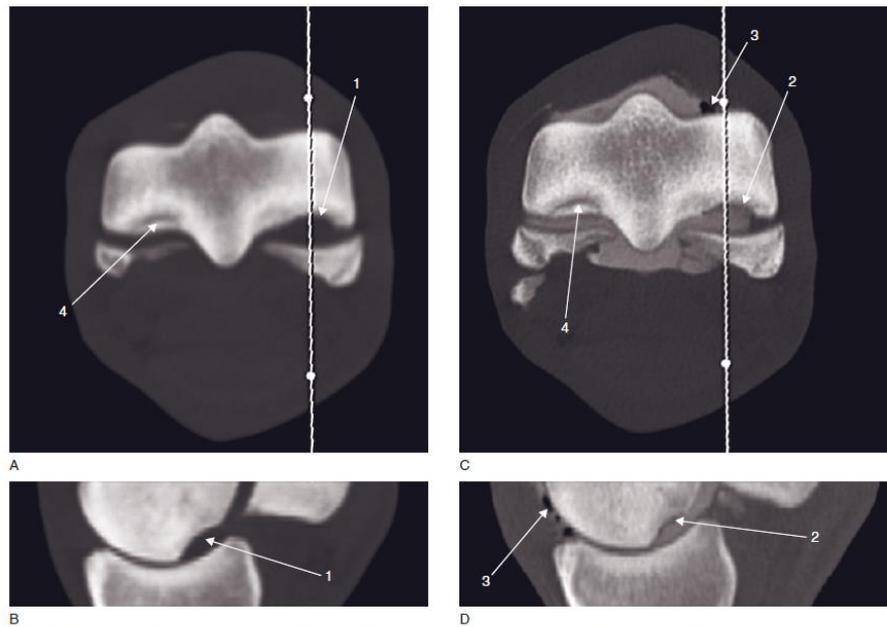


A : fissure de la phalange proximale. B : lésions sous-chondrales avec réaction périostée.

**Figure 43 : Images tomodensitométriques de fractures comminutives de la phalange proximale (Saunders J., Bergman H., 2011).**



**Figure 44 : Images tomodensitométriques de lésions ostéocondrales palmaro-distales du condyle métacarpien (Vanderperren K., Bergman H., 2011).**



A et B : boulet antérieur gauche avant et après injection de produit de contraste en intra-articulaire.  
 1 : défaut osseux sur le condyle médial, entouré de sclérose. 2 : perte de cartilage articulaire et d'os sous-chondral. 3 : bulles d'air iatrogènes après injection de produit de contraste. 4 : fragment ostéocondral en partie palmaire de la partie latérale du condyle.

**Figure 45 : Images tomodensitométriques d'ostéomyélite des os sésamoïdes proximaux (Vanderperren K., Bergman H., 2011).**



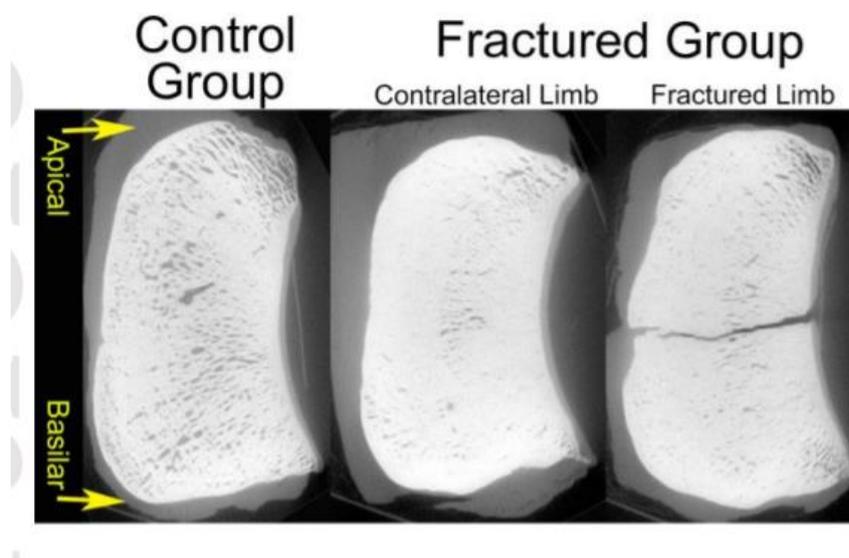
Images de tomodensitométrie avant (A) et après (B) injection de produit de contraste intra-articulaire : 1 : ostéomyélite des os sésamoïdes proximaux 2 : synoviale articulaire saine.

L'étude de K.Vanderperren et al. (2008), indique que la tomodensitométrie présente un réel intérêt dans le diagnostic des kystes osseux sous-chondraux, l'ostéomyélite du bord axial des os sésamoïdes proximaux, les fractures condyliques et les petits fragments d'ostéochondrose.

Le cartilage de l'articulation métacarpo-phalangienne peut être visualisé avec la tomodynamométrie même si la sensibilité pour diagnostiquer des lésions cartilagineuses reste faible (58%). Le chapitre Equine fetlock de K. Vanderperren et H. Bergman (2011) dans Veterinary Computed Tomography appuie ces résultats.

E. Cresswell et al. (2018) ont travaillé sur l'utilité de la micro-tomodensitométrie dans le diagnostic précoce des fractures des os sésamoïdes proximaux chez les pur-sang de course. Ils ont postulé que les os seraient plus denses avant la fracture. Les résultats montrent que la tomodynamométrie permet d'évaluer le risque que le cheval fasse une fracture des os sésamoïdes proximaux car l'os présente une densité et une épaisseur supérieures, ainsi que des trabécules osseuses plus fines. Il faut tout de même nuancer ces propos car la micro-densitométrie nécessite un prélèvement osseux qui n'est pas réalisable sur cheval vivant, ces travaux ne donnent donc pour l'instant que des résultats *in vitro*, il est encore impossible d'obtenir une telle sensibilité avec un scanner classique (Figure 46).

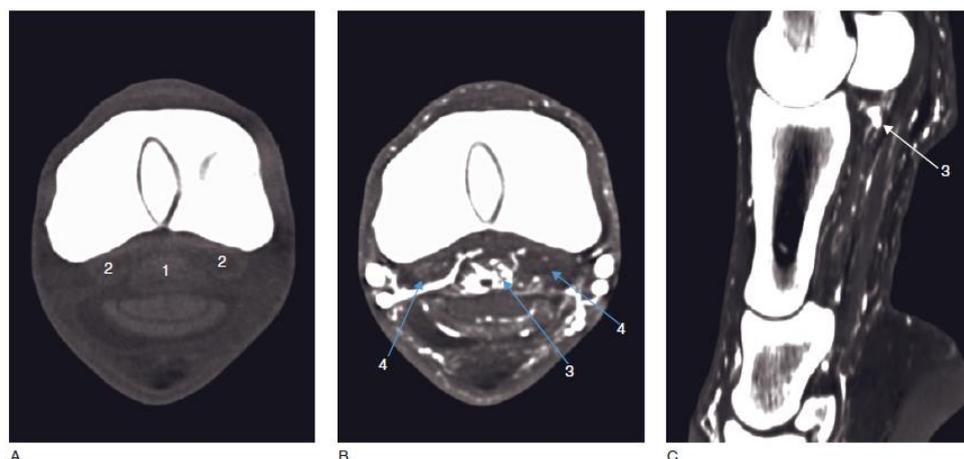
**Figure 46 : Images micro-tomodensitométriques comparatives d'os sésamoïdaux fracturé et controlatéral en comparaison avec celui des chevaux contrôles (Cresswell E., Mcdonough N. et al., 2018).**



### **b. Tissus mous**

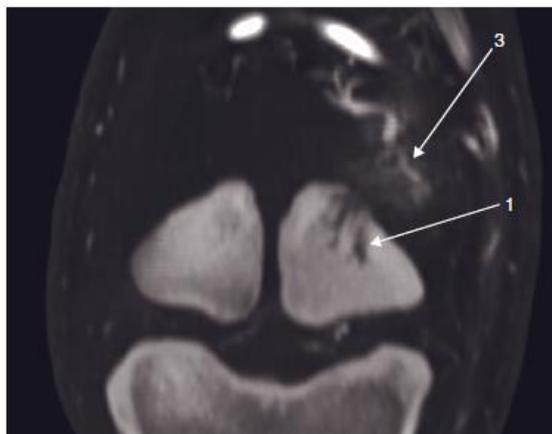
Même si l'indication principale du scanner est l'étude des tissus osseux, différentes études présentent des résultats intéressants pour les tissus mous. Selon K. Vanderperren et H. Bergman (2011), l'indication principale du scanner pour la région du boulet en matière de tissus mous est la desmite des ligaments sésamoïdiens distaux. Il est aussi possible de retrouver des images caractéristiques de desmites d'autres ligaments, tendinites, ou effusions diverses (Figure 47, Figure 48).

**Figure 47 : Images tomodensitométriques de desmrite des ligaments sésamoïdiens distaux (Vanderperren K., Bergman H., 2011).**



A : sans produit de contraste. B et C : avec produit de contraste. 1 : ligament sésamoïdien droit élargi, hétérogène et hypodense. 2 : ligaments sésamoïdiens obliques hypodenses dans leur centre. 3 : rehaussement diffus du ligament sésamoïdien droit par le produit de contraste. 4 : centre des ligaments obliques présentant un contraste augmenté.

**Figure 48 : Image tomodensitométrique illustrant une desmrite du ligament suspenseur du boulet (Vanderperren K., Bergman H., 2011).**



1 : ostéolyse de l'os sésamoïde proximal médial. 3 : rehaussement par le contraste de la branche médiale lésée du ligament suspenseur du boulet.

Pour finir, l'étude de S. Van Hamel et al. (2014) porte sur la correspondance entre les lésions du tendon fléchisseur profond du doigt visibles au scanner et en dissection/ histologie : la sensibilité de la tomodensitométrie pour détecter les lésions est de 93 %, ce qui est considéré comme élevé et fiable. Le scanner serait donc aussi utile pour les tissus mous. Enfin, il est évoqué qu'il y a peu d'études qui comparent vraiment les résultats entre IRM et tomodensitométrie pour les tissus mous, à l'exception de la région du pied du cheval.



# Conclusion

---

Les affections du boulet sont très fréquentes chez les chevaux de sport et de course, en raison des fortes contraintes biomécaniques s'exerçant sur cette articulation lors de l'entraînement ou la compétition. Elles représentent donc une dominante majeure des motifs de consultation pour le vétérinaire. Il est essentiel, pour diagnostiquer, conseiller au mieux et instaurer des traitements efficaces, de connaître l'anatomie de cette région. Cette thèse a pour but d'aider les étudiants dans leur apprentissage de l'anatomie du boulet du cheval.

Pour documenter le plus précisément et le plus largement possible l'anatomie du boulet, nous avons utilisé l'examen tomodensitométrique, aussi appelé scanner. Cette technique d'imagerie repose sur les mêmes principes physiques que la radiologie, et est de plus en plus accessible pour les vétérinaires. Cela nous a permis de constituer un atlas d'images en trois dimensions et de coupes dans tous les plans.

Les images offrent une bonne précision sur la conformation des différentes formations anatomiques de la région du boulet et leurs rapports entre elles. Le scanner a aussi permis d'obtenir des images des synoviales injectées et du réseau vasculaire du boulet.

Les étudiants ont à présent accès à un diaporama d'images légendées de la région du boulet du cheval, ainsi qu'à deux tests de niveau différent pour évaluer leurs connaissances, qu'ils soient en tronc commun ou en spécialité équine. Le diaporama leur permet aussi de se familiariser avec la technique de tomodensitométrie et d'apprendre à manipuler les images obtenues.

Cette thèse s'inscrit dans un travail à plus grande échelle, où d'autres atlas d'anatomie ont été créés avec des images tomodensitométriques des régions du pied-paturon, du carpe, du jarret et de la tête.



# Liste des références bibliographiques

---

BARONE R. (1986) Anatomie comparée des mammifères domestiques. Tome 1, Ostéologie. 3<sup>ème</sup> ed. Paris, Vigot.

BARONE R. (2000) Anatomie comparée des mammifères domestiques. Tome 2, Arthrologie et myologie. 4<sup>ème</sup> ed. Paris, Vigot.

BARONE R. (2011) Anatomie comparée des mammifères domestiques. Tome 5, Angiologie. 2<sup>ème</sup> ed. Paris, Vigot.

BARONE R. (2012) Anatomie comparée des mammifères domestiques. Tome 7, Neurologie. Paris, Vigot.

CEA (2014) Le fonctionnement d'un scanner X. *In Site du commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives*. [[http://www.cea.fr/multimedia/pages/videos/culture-scientifique/sante-sciences-du-vivant/fonctionnement-scannerx.aspxg\\_d9247c6c\\_33b2\\_47f0\\_8fb6\\_a52f1f0ef977=2](http://www.cea.fr/multimedia/pages/videos/culture-scientifique/sante-sciences-du-vivant/fonctionnement-scannerx.aspxg_d9247c6c_33b2_47f0_8fb6_a52f1f0ef977=2)] (consulté le 07/07/2021).

CONTARDI L., MANCINI L., NESIMI L. (2019) Avec l'arrivée du scanner spectral, quels sont les changements dans la pratique quotidienne des TRM ? Travail de Bachelor. Haute École de Santé Genève

CRESSWELL E., MCDONOUGH S., PALMER S. *et al.* (2018) Can quantitative computed tomography detect bone morphological changes associated with catastrophic proximal sesamoid bone fracture in Thoroughbred racehorses? *Equine Veterinary Journal*. Vol. 51, n°1, p. 123-130. [<https://doi.org/10.1111/evj.12965>]

DENOIX J.-M. (2001) Le doigt du Cheval, Atlas d'Anatomie Clinique et d'Imagerie Comparée. Londres, Manson Editions.

HONTOIR F., NISOLLE J.F., MEURISSE H. *et al.* (2014) A comparison of 3-T magnetic resonance imaging and computed tomography arthrography to identify structural cartilage defects of fetlock joint in the horse. *The Veterinary Journal*. Vol. 199, n°1, p. 115-122. [<https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2013.10.021>]

INTERNATIONAL COMMITTEE ON VETERINARY GROSS ANATOMICAL NOMENCLATURE (2005) *Nomina Anatomica Veterinaria*. 5<sup>ème</sup> ed. Hannover, Columbia, Gent, Sapporo, Editorial Committee.

JONES A., RAGLE C., MATTOON J. *et al.* (2019) Use of non-contrast-enhanced computed tomography to identify deep digital flexor tendinopathy in horses with lameness: 28 cases. *Journal of the American Veterinary Medical Association*. Vol. 254, n°7, p.852-858. [<https://doi.org/10.2460/javma.254.7.852>]

KINNS J., MALINOWSKI R., MCEVOY F. *et al.* (2011) Special software applications. *In* SCHWARZ T., SAUNDERS J., *Veterinary Computed Tomography*. Chichester, John Wiley & Sons Ltd, p. 67-74

- MORGAN J., SANTACHI E. ZEKAS L. *et al.* (2006) Comparaison of radiography and computed tomography to evaluate metacarpo/metatarsophalangeal joint pathology of paired limbs of thoroughbred racehorses with severe condylar fracture. *Veterinary surgery*. Vol. 35, n°7, p. 611-617. [<https://doi.org/10.1111/j.1532-950X.2006.00198.x>]
- POLLARD R., PUCHALSKI S. (2011) CT contrast media and applications. *In* SCHWARZ T., SAUNDERS J., *Veterinary Computed Tomography*. Chichester, John Wiley & Sons Ltd, p. 57-66
- RUEL Y. (2000) Tomodensitométrie - Imagerie par résonance magnétique. Polycopié. EnvA, Unité Fonctionnelle de Radiologie
- SAUNDERS J., BERGMAN H.-J. (2011) Equine fractures. *In* SCHWARZ T., SAUNDERS J., *Veterinary Computed Tomography*. Chichester, John Wiley & Sons Ltd, p. 457-462
- SAUNDERS J., OHLERTH S. (2011) CT physics and instrumentation – mechanical design. *In* SCHWARZ T., SAUNDERS J., *Veterinary Computed Tomography*. Chichester, John Wiley & Sons Ltd, p. 1-6
- SAUNDERS J., SCHWARZ T. (2011) Principles of CT image interpretation. *In* *Veterinary Computed Tomography*. Chichester, John Wiley & Sons Ltd, p. 29-34
- VANDERPERREN K., BERGMAN H.-J. (2011) Equine fetlock. *In* SCHWARZ T., SAUNDERS J., *Veterinary Computed Tomography*. Chichester, John Wiley & Sons Ltd, p. 473-48
- VANDERPERREN K., GHAYE B., SNAPS F., *et al.* (2008) Evaluation of computed tomographic anatomy of the equine metacarpophalangeal joint. *American Journal of Veterinary Research*. Vol. 69, n°5, p. 631-638. [<https://doi.org/10.2460/ajvr.69.5.631>]
- VAN HAMEL S., BERGMAN, H., PUCHALSKI S. *et al.* (2014) Contrast-enhanced computed tomographic evaluation of the deep digital flexor tendon in the equine foot compared to macroscopic and histological findings in 23 limbs. *Equine Veterinary Journal*. Vol. 46, n°3, p. 300-305. [<https://doi.org/10.1111/evj.12129>]

# **IMAGERIE SCANNER DU BOULET DU CHEVAL : APPLICATION À L'ENSEIGNEMENT D'ANATOMIE**

---

**AUTEUR : Valentine FEUGÈRE**

## **RÉSUMÉ :**

Cette thèse a pour objectif la création d'un support pédagogique pour les étudiants vétérinaires, portant sur l'anatomie du boulet du cheval. Les affections de cette région sont fréquentes chez les chevaux de sport et de course, en raison des contraintes biomécaniques fortes s'exerçant sur l'articulation lors de l'entraînement et des compétitions. Pour diagnostiquer, traiter et prévenir au mieux ces affections, un vétérinaire se doit de maîtriser l'anatomie et les rapports des différentes formations anatomiques du boulet entre elles.

La tomodensitométrie, aussi appelée imagerie scanner, a permis la réalisation de ce travail d'étude de l'anatomie du boulet du cheval. Cette technique utilise les mêmes principes physiques que la radiographie et offre différents outils pour créer des images à partir d'une seule acquisition : pour cette thèse, les modes de reconstruction en trois dimensions, MPR (Multi Planar Reconstruction) pour des images en coupes, ainsi que les filtres tissus osseux et mous ont été appliqués. Un arthro-scanner a aussi été mis en œuvre pour obtenir des images après injection de produit de contraste par voie intravasculaire et dans les cavités synoviales.

Le support pédagogique est constitué d'un atlas d'images tomodensitométriques sélectionnées et légendées. Les clichés sont présentés dans un diaporama mis à disposition sur la plateforme pédagogique Eve de l'École nationale vétérinaire d'Alfort. Deux tests d'auto-évaluation ont également été conçus sur Eve afin que les étudiants de tronc commun et ceux se destinant à une pratique équine plus intensive puissent tester leurs connaissances de l'anatomie 3D de cette région.

Cette thèse s'inscrit dans un travail à plus grande échelle, où d'autres atlas d'anatomie ont été créés avec des images tomodensitométriques des régions du pied-paturon, du carpe, du jarret et de la tête.

**MOTS CLÉS : ANATOMIE, IMAGERIE SCANNER, TOMODENSITOMÉTRIE, ENSEIGNEMENT, BOULET, CHEVAL, APPAREIL LOCOMOTEUR**

## **JURY :**

Présidente : Pr Céline ROBERT

Directeur de thèse : Pr Fabrice AUDIGIÉ

Examineur : Pr Henry CHATEAU

# CT IMAGING OF THE FETLOCK: APPLICATION TO ANATOMY TEACHING

---

**AUTHOR: Valentine FEUGÈRE**

## **SUMMARY:**

The aim of this thesis is to create a teaching aid for veterinary students on the anatomy of the fetlock. This area is frequently affected in sport and racehorses due to the high biomechanical stresses placed on the joint during training and competition. In order to diagnose, treat and prevent these conditions, a veterinarian must be familiar with the anatomy and the relationship of the various anatomical formations of the fetlock.

Computed tomography, also known as CT imaging, has made it possible to study the anatomy of the fetlock. This technique uses the same physical basis as radiography and offers different tools to create images from a single acquisition: for this thesis, three-dimensional reconstruction modes, MPR (Multi Planar Reconstruction) for cross-sectional images, as well as bone and soft tissue filters were applied. An arthro-scanner was also used to obtain images after injection of contrast medium into the synovial cavities and intravascular injections were performed.

The teaching aid consists of an atlas of selected and captioned CT images. The images are presented in a slide show made available on the Eve educational platform of Alfort national veterinary school. Two self-assessment tests have also been designed on Eve so that students in the core curriculum and those intending to pursue more intensive equine practice can test their knowledge of the 3D anatomy of this region.

This thesis is part of a larger scale project, where other anatomy atlases have been created with CT images of the foot-pastern, carpal, hock and head regions.

**KEYWORDS: ANATOMY, CT IMAGING, CT SCAN, TEACHING, FETLOCK, HORSE, LOCOMOTOR APPARATUS**

## **JURY:**

Chairperson: Pr Céline ROBERT

Thesis Director: Pr Fabrice AUDIGIÉ

Reviewer: Pr Henry CHATEAU