



## Open Archive TOULOUSE Archive Ouverte (OATAO)

OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in : [http://oatao.univ-toulouse.fr/Eprints ID : 4580](http://oatao.univ-toulouse.fr/Eprints/ID%3A4580)

**To cite this version :**

TRAN-DAC, Emilie. *Atlas tomodensitométrique avec injection de produit de contraste du grasset du chien : application à la rupture du ligament croisé crânial et comparaison aux autres techniques d'imagerie* . Thèse d'exercice, Médecine vétérinaire, Toulouse 3, 2010, 94 p.

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator: [staff-oatao@inp-toulouse.fr](mailto:staff-oatao@inp-toulouse.fr).

# **ATLAS TOMODENSITOMETRIQUE AVEC INJECTION DE PRODUIT DE CONTRASTE DU GRASSET DU CHIEN**

***Application à la rupture du ligament croisé crânial et  
comparaison aux autres techniques d'imagerie***

---

THESE  
pour obtenir le grade de  
DOCTEUR VETERINAIRE

DIPLOME D'ETAT

*présentée et soutenue publiquement en 2010  
devant l'Université Paul-Sabatier de Toulouse  
par*

**TRAN-DAC EMILIE**  
Né, le 12 juillet 1985 à Ivry-sur-Seine (94)

---

**Directeur de thèse : Mr. le Docteur Giovanni MOGICATO**

---

## **JURY**

PRESIDENT :  
**Mme BERRY Isabelle**

Professeur à l'Université Paul-Sabatier de TOULOUSE

ASSESEUR :  
**M. MOGICATO Giovanni**  
**M. SAUTET Jean**

Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE  
Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE

**Ministère de l'Agriculture et de la Pêche  
ECOLE NATIONALE VETERINAIRE DE TOULOUSE**

**Directeur** : M. A. MILON

**Directeurs honoraires** M. G. VAN HAVERBEKE.  
M. P. DESNOYERS

**Professeurs honoraires** :

M. L. FALIU	M. J. CHANTAL	M. BODIN ROZAT DE MENDRES NEGRE
M. C. LABIE	M. JF. GUELFY	M. DORCHIES
M. C. PAVAU	M. EECKHOUTTE	
M. F. LESCURE	M. D.GRIESS	
M. A. RICO	M. CABANIE	
M. A. CAZIEUX	M. DARRE	
Mme V. BURGAT	M. HENROTEAUX	

**PROFESSEURS CLASSE EXCEPTIONNELLE**

M. **BRAUN Jean-Pierre**, *Physique et Chimie biologiques et médicales*  
M. **EUZEBY Jean**, *Pathologie générale, Microbiologie, Immunologie*  
M. **FRANC Michel**, *Parasitologie et Maladies parasitaires*  
M. **PETIT Claude**, *Pharmacie et Toxicologie*  
M. **TOUTAIN Pierre-Louis**, *Physiologie et Thérapeutique*

**PROFESSEURS 1° CLASSE**

M. **AUTEFAGE André**, *Pathologie chirurgicale*  
Mme **CLAUW Martine**, *Pharmacie-Toxicologie*  
M. **CONCORDET Didier**, *Mathématiques, Statistiques, Modélisation*  
M. **CORPET Denis**, *Science de l'Aliment et Technologies dans les Industries agro-alimentaires*  
M. **DELVERDIER Maxence**, *Anatomie Pathologique*  
M. **ENJALBERT Francis**, *Alimentation*  
M. **MARTINEAU Guy**, *Pathologie médicale du Bétail et des Animaux de Basse-cour*  
M. **REGNIER Alain**, *Physiopathologie oculaire*  
M. **SAUTET Jean**, *Anatomie*  
M. **SCHELCHER François**, *Pathologie médicale du Bétail et des Animaux de Basse-cour*

**PROFESSEURS 2° CLASSE**

Mme **BENARD Geneviève**, *Hygiène et Industrie des Denrées alimentaires d'Origine animale*  
M. **BERTHELOT Xavier**, *Pathologie de la Reproduction*  
M. **BOUSQUET-MELOU Alain**, *Physiologie et Thérapeutique*  
Mme **CHASTANT-MAILLARD Sylvie**, *Pathologie de la Reproduction*  
M. **DUCOS Alain**, *Zootéchnie*  
M. **DUCOS DE LAHITTE Jacques**, *Parasitologie et Maladies parasitaires*  
M. **FOUCRAS Gilles**, *Pathologie des ruminants*  
Mme **GAYRARD-TROY Véronique**, *Physiologie de la Reproduction, Endocrinologie*  
M. **GUERRE Philippe**, *Pharmacie et Toxicologie*  
Mme **HAGEN-PICARD Nicole**, *Pathologie de la Reproduction*  
M. **JACQUIET Philippe**, *Parasitologie et Maladies Parasitaires*  
M. **LEFEBVRE Hervé**, *Physiologie et Thérapeutique*  
M. **LIGNEREUX Yves**, *Anatomie*  
M. **PICAVET Dominique**, *Pathologie infectieuse*  
M. **SANS Pierre**, *Productions animales*  
Mme **TRUMEL Catherine**, *Pathologie médicale des Equidés et Carnivores*

#### PROFESSEURS CERTIFIES DE L'ENSEIGNEMENT AGRICOLE

Mme **MICHAUD Françoise**, *Professeur d'Anglais*

M **SEVERAC Benoît**, *Professeur d'Anglais*

#### MAITRES DE CONFERENCES HORS CLASSE

Mme **BOURGES-ABELLA Nathalie**, *Histologie, Anatomie pathologique*

M. **JOUGLAR Jean-Yves**, *Pathologie médicale du Bétail et des Animaux de Basse-cour*

#### MAITRES DE CONFERENCES (classe normale)

M. **ASIMUS Erik**, *Pathologie chirurgicale*

M. **BAILLY Jean-Denis**, *Hygiène et Industrie des Denrées alimentaires d'Origine animale*

Mme **BENNIS-BRET Lydie**, *Physique et Chimie biologiques et médicales*

M. **BERGONIER Dominique**, *Pathologie de la Reproduction*

M. **BERTAGNOLI Stéphane**, *Pathologie infectieuse*

Mlle **BIBBAL Delphine**, *Hygiène et Industrie des Denrées alimentaires d'Origine animale*

Mme **BOUCLAINVILLE-CAMUS Christelle**, *Biologie cellulaire et moléculaire*

Mlle **BOULLIER Séverine**, *Immunologie générale et médicale*

M. **BRUGERE Hubert**, *Hygiène et Industrie des Denrées alimentaires d'Origine animale*

Mlle **CADIERGUES Marie-Christine**, *Dermatologie*

M. **CONCHOU Fabrice**, *Imagerie médicale*

M. **CORBIERE Fabien**, *Pathologie des ruminants*

Mlle **DIQUELOU Armelle**, *Pathologie médicale des Equidés et des Carnivores*

M. **DOSSIN Olivier**, *Pathologie médicale des Equidés et des Carnivores*

Mlle **FERRAN Aude**, *Physiologie*

M. **GUERIN Jean-Luc**, *Elevage et Santé avicoles et cunicoles*

M. **JAEG Jean-Philippe**, *Pharmacie et Toxicologie*

Mlle **LACROUX Caroline**, *Anatomie Pathologique des animaux de rente*

Mme **LETRON-RAYMOND Isabelle**, *Anatomie pathologique*

M. **LIENARD Emmanuel**, *Parasitologie et maladies parasitaires*

M. **LYAZRHI Faouzi**, *Statistiques biologiques et Mathématiques*

M. **MAILLARD Renaud**, *Pathologie des Ruminants*

M. **MAGNE Laurent**, *Urgences soins-intensifs*

M. **MATHON Didier**, *Pathologie chirurgicale*

M **MEYER Gilles**, *Pathologie des ruminants.*

Mme **MEYNAUD-COLLARD Patricia**, *Pathologie Chirurgicale*

M. **MOGICATO Giovanni**, *Anatomie, Imagerie médicale*

Mlle **PALIERNE Sophie**, *Chirurgie des animaux de compagnie*

Mme **PRYMENKO Nathalie**, *Alimentation*

Mme **TROEGELER-MEYNADIER Annabelle**, *Alimentation*

M. **VOLMER Romain**, *Microbiologie et Infectiologie (disponibilité à cpt du 01/09/10)*

M. **VERWAERDE Patrick**, *Anesthésie, Réanimation*

#### MAITRES DE CONFERENCES et AGENTS CONTRACTUELS

M. **IRUBETAGOYENA Iban**, *Chirurgie des animaux de compagnie*

M. **SOUBIES Sébastien**, *Microbiologie et infectiologie*

#### ASSISTANTS D'ENSEIGNEMENT ET DE RECHERCHE CONTRACTUELS

M. **DOUET Jean-Yves**, *Ophtalmologie*

Mlle **LAVOUE Rachel**, *Médecine Interne*

M. **NOUVEL Laurent**, *Pathologie de la reproduction*

Mlle **PASTOR Mélanie**, *Médecine Interne*

M. **RABOISSON Didier**, *Productions animales*

Mlle **TREVENNEC Karen**, *Epidémiologie, gestion de la santé des élevages avicoles et porcins*

M **VERSET Michaël**, *Chirurgie des animaux de compagnie*

# **REMERCIEMENTS**

## **A Madame le Professeur Isabelle BERRY**

Professeur des Universités

Praticien hospitalier

*Biophysique*

qui nous a fait l'honneur de présider notre jury de thèse. Hommages respectueux.

## **A Monsieur le Docteur Giovanni MOGICATO**

Maître de Conférences de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse

*Anatomie-Imagerie médicale*

Qui a accepté de superviser notre travail. Qu'il trouve ici l'expression de notre sincère reconnaissance.

## **A Monsieur le Professeur Jean SAUTET**

Professeur de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse

*Anatomie*

Qui a accepté de relire notre travail et de participer à notre jury de thèse.

## **Au Docteur Franc DURIEUX**

Qui nous a aidé et guidé dans les étapes de la réalisation de ce travail.

Merci.

**Un grand merci aussi.....**

**A ma famille, ma mère sans qui je n'en serais pas là aujourd'hui, mon père pour son amour et mon grand frère pour tous ces joyeux souvenirs d'enfance; ma tatatitounette et mon tontontitounet pour tous ces formidables moments passés ensemble, et à ceux à venir.**

**A mon amour, Julien, ma plus belle rencontre.**

**A mes amis, feu les parisiens, avec qui j'ai grandi :**

**A Pierre, mon tout petit ami, cet ..... de trader algorithmique. Merci d'être toujours plus en retard que moi. Let's see you in NYC !**

**A Thibault, mon tout petit ami aussi : pour ce fantastique WE à Londres, mais surtout pour ce sandwich à la tomate, ce sac en plastique transparent et ce vol d'Icare qui resteront à jamais gravés dans ma mémoire...(tu feras attention, il t'en reste un peu sur la chaussure)**

**A Thomas, pour tes logorrhées anticonformistes**

**A Victor, pour être toujours attentif à mes petits coups de blues**

**A Xavier, pour la parenthèse de quelques heures qu'on s'offre dans nos vies à chaque fois qu'on se voit**

**A mes amis toulousains :**

**A Aude-Olga, toujours pleine de surprises !!**

**A Zozal la tornade-Francis-Guy, pour le diagona et tout ce qui a suivi...j'en ris encore !**

**A Déborah, pour toutes ces années à tes côtés et ces innombrables souvenirs de rires et de larmes : merci pour le malibu (parce que c'est chaud d'être gros), tes gâteaux sans sucre et sans œufs, le 4L trophy (à notre titine au coffre et au pneu arrière-droit parfois difficiles)...**

**A Marion, pour tous ces tête-à-têtes salvateurs**

**A Pauline, pour tout ce que tu sais. Au fait, la madame du RU cherche sa jolie veste, tu l'aurais pas vu par hasard?**

**A Miloute, merci d'avoir été là dans pleins de bons mais aussi quelques mauvais moments**

**A Amandine, pour toutes ces années à tes côtés**

**A Anne-Claire, pour toutes ces parties de franches rigolades**

**A Fanny, pour toutes ces discussions interminables (t'as le bonjour de mon voisin Géorgien)**

**A Etienne, pour ta sincérité et ton attention**

**A Guillaume pour cette mémorable année de T1Pro, pour la nuit du Cordon bleu, pour cette OVH qui n'aurait jamais due avoir lieu, pour ce repas de Noel aux hôpitaux de chir (désolé Choco, on savait pas que t'étais allergique)**

**A tous les autres avec qui j'ai pu passer de bons moments : Béa, Jon, Valérie, Canari, Cassou, Clément, Juju, Steph, Romain, Nathou, Pépé, Bibi...**

**Un petit mot en souvenir du Queen aussi, pour m'avoir hébergée deux ans sans me faire reconduire dans mon pays.**

**Au labo central de l'ENVT bien sûr, dans le désordre : Cathy, Pierre (et Lady Gaga), Nanou, Hélène, Flo, Claude, Claire, NBA, Cathy L., Sophie, JPB. Merci de m'avoir tant appris avec gentillesse et patience !**

**A Aquivet et tous ses membres présents et passés, pour leur accueil toujours agréable, et tout particulièrement à Franck, Marie et Julien sans qui je n'aurai pas pu faire cette thèse, ainsi qu'à Matthieu pour l'anglais...**



# TABLE DES MATIERES

<u>TABLE DES MATIERES</u> .....	13
<u>TABLE DES ILLUSTRATIONS</u> .....	15
<u>INTRODUCTION</u> .....	20
<u>1ERE PARTIE : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE</u> .....	21
A. ANATOMIE DU GRASSET DU CHIEN.....	21
I. LE FEMUR DISTAL.....	22
II. LE TIBIA PROXIMAL.....	22
III. LES MENISQUES.....	23
IV. CAPSULE ET SYNOVIALE ARTICULAIRE.....	25
V. LIGAMENTS.....	25
B. ETIOPATHOGENIE DE LA RUPTURE DU LCCR.....	27
I. EPIDEMIOLOGIE.....	27
II. PATHOGENIE.....	28
III. INTERET DE L'IMAGERIE DANS LA RUPTURE DU LIGAMENT CROISE CRANIAL..	30
1. AIDE AU DIAGNOSTIC.....	30
2. DIAGNOSTIC DES LESIONS MENISCALES.....	33
3. PRISE DE MESURES ET DE REPERES PRE-OPERATOIRES.....	33
IV. IMAGERIE DE LA RUPTURE DU LIGAMENT CROISE CRANIAL.....	34
1. EXAMEN RADIOGRAPHIQUE.....	34
a. ANATOMIE ET TECHNIQUE RADIOGRAPHIQUE.....	34
b. MODIFICATIONS RADIOGRAPHIQUES LIEES A LA RUPTURE DU LIGAMENT CROISE CRANIAL.....	36
c. MESURES RADIOGRAPHIQUES PRE-OPERATOIRES.....	40
2. EXAMEN ULTRASONOGRAPHIQUE.....	42
a. ANATOMIE ET TECHNIQUE ECHOGRAPHIQUE.....	42
i. L'examen du récessus suprapatellaire.....	42
ii. L'examen du compartiment infrapatellaire.....	42
iii. L'examen du compartiment latéral.....	42
iv. L'examen du compartiment médial.....	43
b. LESIONS OBSERVABLES LORS DE RUPTURE DU LIGAMENT CROISE CRANIAL.....	43
c. INTERET DE L'EXAMEN ECHOGRAPHIQUE DU LIGAMENT CROISE CRANIAL.....	48
3. L'IMAGERIE PAR RESONNANCE MAGNETIQUE.....	48
a. ANATOMIE ET TECHNIQUE DE L'IRM DU GRASSET.....	48
b. IMAGE IRM SUITE A LA RUPTURE DU LIGAMENT CROISE CRANIAL.....	53
c. INTERET ET LIMITES DE L'EXAMEN IRM DANS RUPTURE DU LIGAMENT CROISE CRANIAL .....	56
<u>2EME PARTIE : ETUDE DE LA TOMODENSITOMETRIE</u> .....	58
A. LE PRINCIPE DE LA TOMODENSITOMETRIE.....	59
I. INTRODUCTION.....	59
II. MECANISMES PHYSIQUES.....	59
III. EFFETS PHOTOELECTRIQUES, COMPTON ET THOMSON.....	61
1. EFFET PHOTOELECTRIQUE.....	61
2. EFFET COMPTON.....	62

3. EFFET THOMSON.....	63
IV. FORMATION DE L'IMAGE DE TOMODENSITOMETRIE.....	63
1. LES MESURES.....	63
2. LA RECONSTRUCTION.....	63
3. L'AFFICHAGE.....	65
B. LE FONCTIONNEMENT DU SCANNER.....	67
I. L'APPAREIL.....	67
II. LES REGLAGES DE L'APPAREIL.....	68
III. DEROULEMENT D'UN ARTHROSCANNER.....	69
IV. QUALITES DE L'IMAGE ET ARTEFACTS.....	70
1. GENERALITES.....	70
2. RESOLUTION DENSITOMETRIQUE.....	70
3. RESOLUTION SPATIALE.....	70
4. ARTEFACTS SCANOGRAPHIQUES.....	77
V. UTILISATION DE PRODUITS DE CONTRASTE.....	71
<b><u>3EME PARTIE : ETUDE TOMODENSITOMETRIQUE DU GRASSET</u></b> .....	<b>72</b>
A. LES IMAGES TOMODENSITOMETRIQUES SANS INJECTION DE PRODUIT DE CONTRASTE.....	73
B. LES IMAGES TOMODENSITOMETRIQUES APRES INJECTION DE PRODUIT DE CONTRASTE.....	76
I. MATERIEL ET METHODE.....	76
1. MATERIEL ET METHODE D'INJECTION DE L'ARTICULATION DU GENOU.....	76
2. MATERIEL ET PROTOCOLE D'ACQUISITION TOMODENSITOMETRIQUE.....	77
II. LES IMAGES PHYSIOLOGIQUES.....	77
III. LES IMAGES PATHOLOGIQUES.....	81
IV. INTERETS ET LIMITES DE L'ARTHROSCANNER.....	83
<b><u>CONCLUSION</u></b> .....	<b>87</b>
<b><u>BIBLIOGRAPHIE</u></b> .....	<b>91</b>

## TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Face crâniale du fémur gauche .....	22
Figure 2 : Face caudale du fémur gauche.....	22
Figure 3 : Face caudale du tibia gauche.....	23
Figure 4 : Face latérale du tibia gauche.....	23
Figure 5 : Vue dorsale de l'extrémité proximale du tibia gauche montrant les ménisques et leurs insertions .....	24
Figure 6 : Vues du genou gauche faisant apparaître la synoviale articulaire.....	25
Figure 7 : Vue médiale des ligaments croisés d'un genou gauche .....	26
Figure 8 : Vue dorsale des ligaments croisés.....	27
Figure 9 : Classification des ruptures du ligament croisé crânial .....	28
Figure 10 : Mécanisme des lésions du ménisque médial.....	29
Figure 11 : Représentation schématisée des deux principales lésions méniscales : écrasement de la corne caudale et lésion longitudinale dite « en anse de panier ».....	30
Figure 12 : Signe du tiroir direct.....	31
Figure 13 : Signe du tiroir indirect.....	32
Figure 14 : Radiographie médio-latérale.....	35
Figure 15 : Radiographie caudo-crâniale.....	35
Figure 16 : Radiographie latérale d'un grasset normal.....	37
Figure 17 : Subluxation tibiale crâniale mise en évidence sur une radiographie d'un genou atteint de rupture de LCCr : avancement du tibia par rapport à l'extrémité distale du fémur, le genou étant fléchi à 90°.....	37
Figure 18 : Radiographie de profil du grasset : modifications radiographiques liées à la rupture du LCCr.....	39
Figure 19 : Radiographie de face du grasset : modifications radiographiques liées à la rupture du LCCr.....	40
Figure 20 : Mesure d'angle pré-opératoire pour la planification d'une TPLO.....	40
Figure 21 : Image suprapatellaire sagittale : effusion liquidienne.....	43
Figure 22 : Image infrapatellaire normale.....	44
Figure 23 : Image infrapatellaire sagittale : effusion articulaire.....	44
Figure 24 : Image infrapatellaire sagittale : ligament croisé crânial normal.....	45
Figure 25 : Image en région latérale coupe sagittale.....	45
Figure 26 : Image en région médiale en coupe sagittale.....	46
Figure 27 : Image infrapatellaire sagittale : rupture du ligament croisé crânial.....	46
Figure 28 : En région sagittale : dégénérescence du ménisque médial.....	47
Figure 29 : Comparaison de l'image échographique d'un ménisque sain et d'un ménisque présentant une lésion .....	47
Figure 30 : Image IRM en densité de proton d'un grasset normal.....	49
Figure 31 : Image IRM frontale pondérée en T2 d'un grasset sain.....	50
Figure 32 : Image IRM pondérée en T1 d'un grasset normal.....	51
Figure 33 : Image IRM sagittale pondérée en T2 d'un grasset sain.....	52
Figure 34 : Image IRM sagittale pondérée en T1 d'un grasset après injection de gadolinium.....	52
Figure 35 : Image IRM sagittale pondérée en T2 d'un grasset 6 mois après rupture du LCCr.....	53

Figure 36 : Image IRM sagittale pondérée en T2 d'un grasset présentant une rupture partielle du LCCr.....	54
Figure 37 : Image IRM sagittale pondérée en T1 d'un grasset présentant une lésion méniscale.....	55
Figure 38 : Image IRM en densité de proton d'un grasset présentant une lésion méniscale...	56
Figure 39 : Illustration du phénomène de freinage.....	60
Figure 40 : Schéma de la diffusion Compton.....	62
Figure 41 : Correspondance entre voxels, pixels et matrice. Mode de représentation des coefficients d'atténuation.....	64
Figure 42 : Echelle de Hounsfield.....	65
Figure 43 : Notion de fenêtre et de niveau.....	66
Figure 44 : Principe d'acquisition de l'image et du couple source-détecteur de rayons autour du patient.....	68
Figure 45 : Coupe tomодensitométrique frontale d'un grasset sain en croissance.....	73
Figure 46 : Coupes tomодensitométriques sagittales centrale et médiale d'un grasset sain en croissance.....	74
Figure 47 : : Coupes tomодensitométriques transverses d'un grasset sain : au niveau de la fosse intercondylienne, au niveau des condyles fémoraux et au niveau des ménisques.....	75
Figure 48 : Site d'injection de l'articulation du grasset.....	77
Figure 49 : Coupes transverses après injection de produit de contraste des condyles tibiaux à la fosse intercondylienne.....	78
Figure 50 : Coupes sagittales après injection de produit de contraste : au niveau du LCCd et au niveau du LCCr.....	79
Figure 51 : Coupe parasagittale médiale après injection de produit de contraste.....	79
Figure 52 : Coupe arthroscanner caudale après injection de produit de contraste.....	80
Figure 53 : Coupe arthroscanner frontale d'un grasset présentant une fissure longitudinale du ménisque et une corne postérieure retournée crânialement .....	82
Figure 54 : Coupe arthroscanner frontale d'une grasset avant et après méniscectomie médiale.....	83
Figure 55 : Coupe arthroscanner frontale d'un grasset avec présence d'une suture fabello-tibiale.....	85
Figure 56 : Coupe arthroscanner frontale d'un grasset avec présence d'une plaque de TPLO de 3.5 mm.....	86

## **LISTE DES ABREVIATIONS**

LCCr : ligament croisé crânial

LCCd : ligament croisé caudal

TPLO : tibial plateau leveling osteotomy

TTA : Tibial tuberosity advancement



## INTRODUCTION

Le ligament croisé crânial est le principal élément de stabilité crânio-caudale du grasset chez le chien. Sa rupture partielle ou totale est responsable de l'apparition d'une boiterie du membre pelvien et d'arthrose du grasset. Cette pathologie est l'affection musculo-squelettique la plus fréquente chez le chien.

Classiquement, l'étude complémentaire des articulations se fait au moyen de la radiographie avec ou sans produit de contraste (arthrographie), ainsi que par arthroscopie. L'injection de produit de contraste permet la visualisation de toutes les structures radiotransparentes (cartilage, ligament...), mais la superposition des structures lors d'arthrographie rend délicate l'interprétation des images obtenues.

L'imagerie médicale a fait une très nette avancée depuis les années 1970, notamment avec la tomodensitométrie, encore appelée scanographie, ou scanner. La tomodensitométrie à rayons X est examen encore peu répandu et relativement onéreux, mais en voie de démocratisation, qui est en train d'investir à grande vitesse le monde vétérinaire, et qui palie au problème de superposition des structures rencontré avec la radiographie. L'injection de produit de contraste au cours d'un examen tomodensitométrique, c'est-à-dire la réalisation d'un arthroscanner, rend alors les structures radiotransparentes visibles, sans effet de superposition. Cet examen, très répandu en médecine humaine, se développe en médecine vétérinaire.

Dans une première partie, nous étudierons l'anatomie du grasset du chien, sa biomécanique, l'aspect clinique de la rupture du ligament croisé crânial, et les différentes techniques de traitement de la rupture du ligament croisé crânial par nivellement du plateau tibial décrites à ce jour. Dans une deuxième partie, nous étudierons la tomodensitométrie, son principe et sa réalisation. Nous décrirons les modalités d'utilisation chez les animaux domestiques afin d'élaborer des images d'anatomie normale du grasset de ces espèces afin d'établir une base de données et de comparaison à l'usage des vétérinaires. De plus, de nombreuses applications de l'arthroscanner sont connues en médecine humaine, et seulement en voie de développement en médecine animale. De multiples voies de recherche restent à explorer dans ce domaine.

## **1ère partie : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

## **A. ANATOMIE DU GRASSET DU CHIEN**

L'articulation du grasset ou articulation fémoro-tibio-patellaire, est une diarthrose condyloïde composée de deux parties interdépendantes : l'articulation fémoro-patellaire et l'articulation fémoro-tibiale.

L'articulation du grasset permet les mouvements de flexion et d'extension du tibia par rapport au fémur, mais aussi des mouvements latéraux (abduction, adduction) et des mouvements de rotation.

### **I. LE FEMUR DISTAL**

La trochlée s'apparente à une gouttière verticale limitée par deux lèvres médiale et latérale. La patelle s'articule en coulissant dans la trochlée, elle se forme dans l'épaisseur du ligament tibio-patellaire. Elle est entourée par deux fibro-cartilages parapatellaires médial et latéral. Les condyles fémoraux sont le prolongement caudal des lèvres trochléaires, séparés par la fosse intercondylienne. Les os sésamoïdes supracondyliens se logent caudalement aux deux condyles, dans l'enthèse du muscle gastrocnémien (Fig. 1 et 2) .

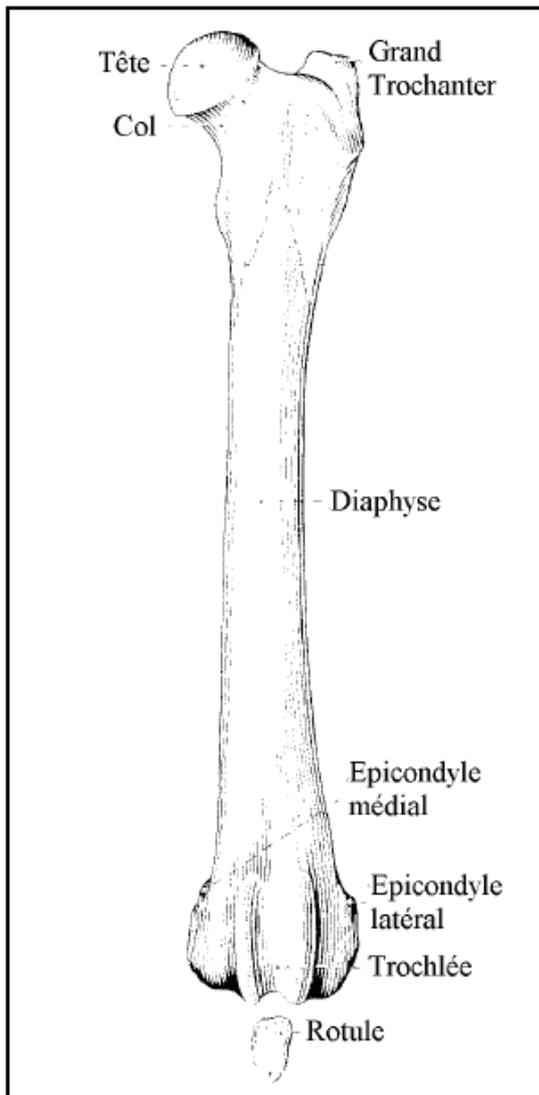


Figure 1 : Face crâniale du fémur gauche

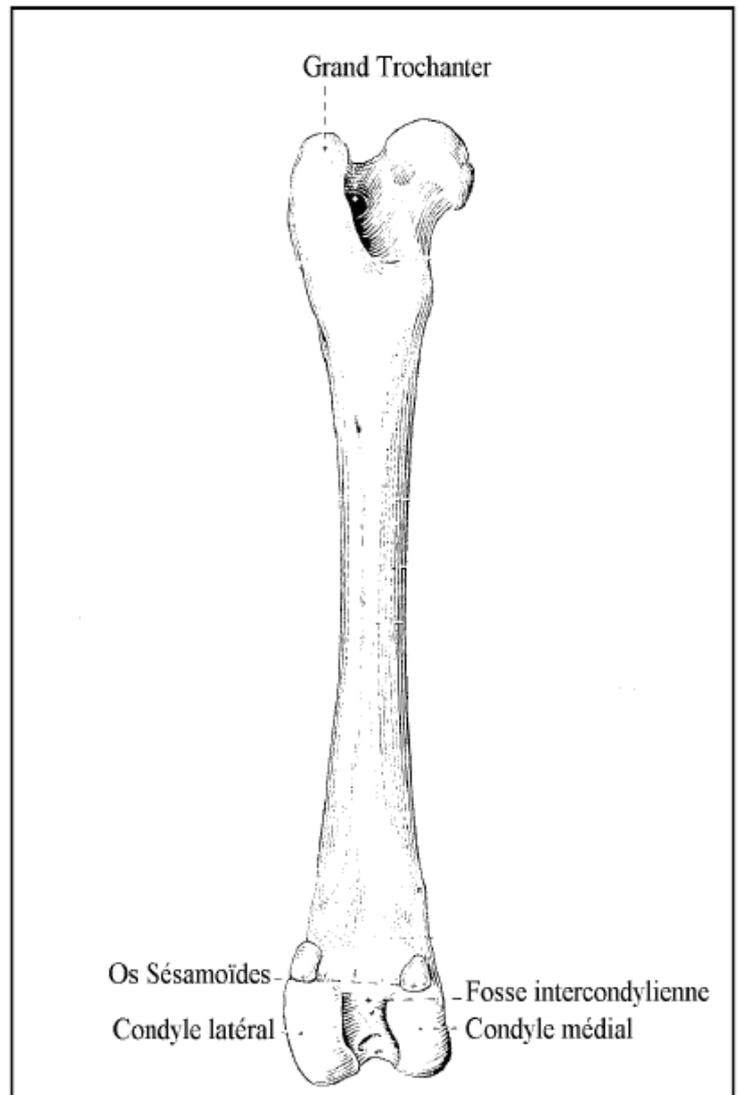


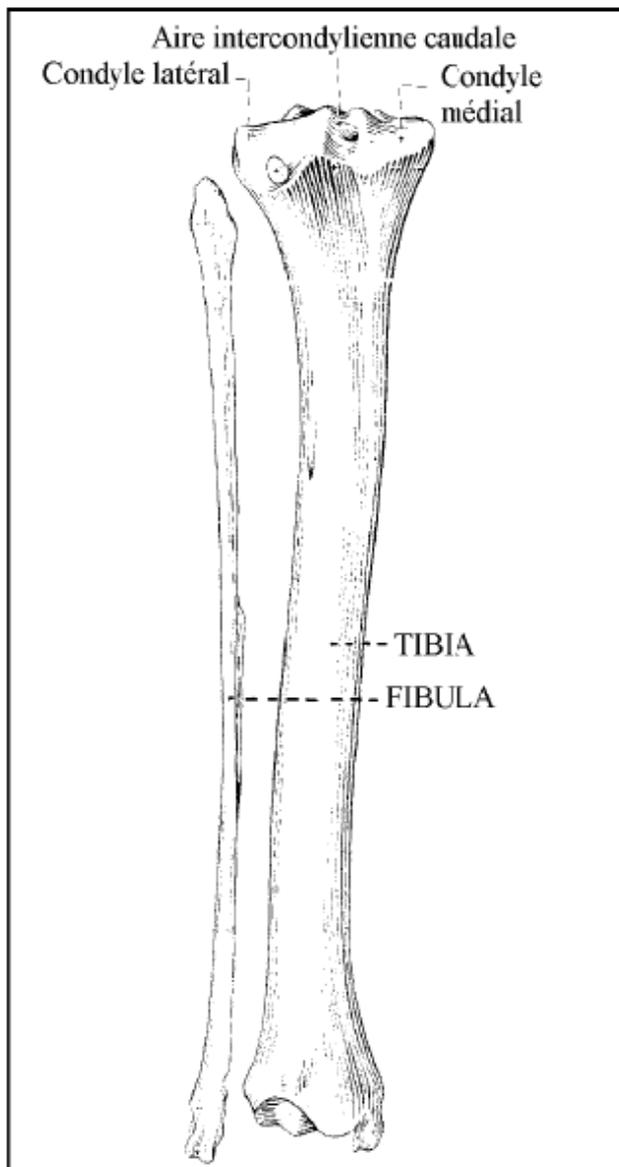
Figure 2 : Face caudale du fémur gauche

(D'après [5])

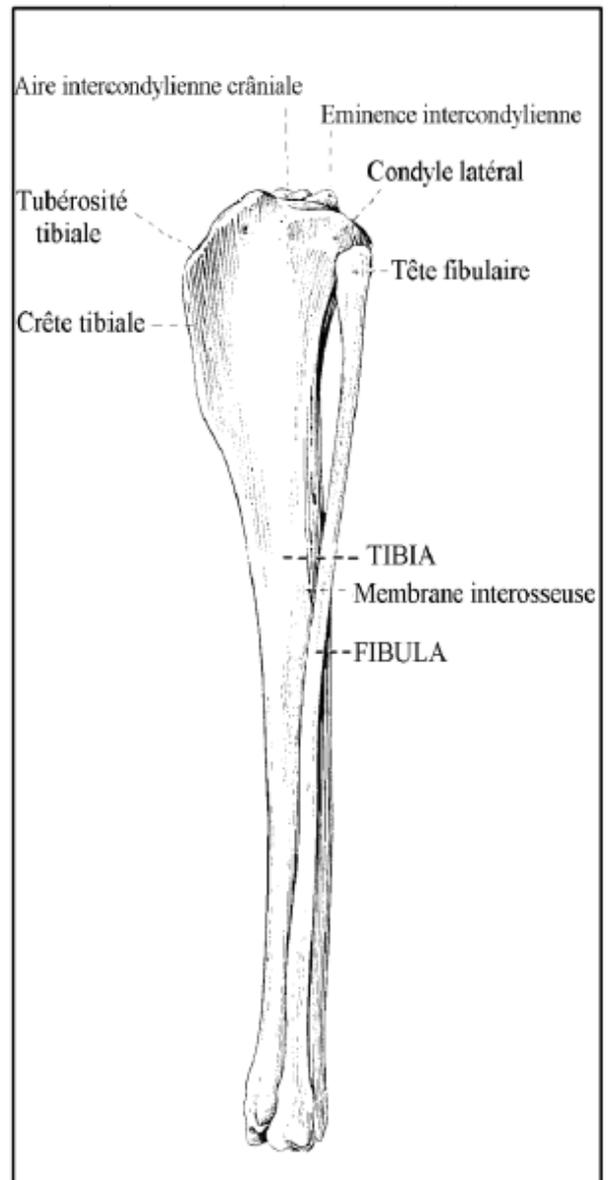
## II. LE TIBIA PROXIMAL

Le tibia proximal est composé de deux condyles médial et latéral asymétriques séparés par l'éminence intercondylienne. La surface formée correspond au plateau tibial. Crânialement, on retrouve la tubérosité tibiale qui constitue l'enthèse du ligament tibio-patellaire. Elle se prolonge distalement en une crête tibiale de forme et de proportion variable.

Caudalement et latéralement au tibia s'articule la fibula par l'articulation tibio-fibulaire (Fig 3 et 4).



**Figure 3 : Face caudale du tibia gauche**  
(D'après [5])



**Figure 4 : Face latérale du tibia gauche**

### III. LES MENISQUES

Les ménisques sont au nombre de deux, l'un latéral, l'autre médial. Ce sont des structures fibro-cartilagineuses en forme de croissant intercalées entre le plateau tibial et les condyles fémoraux et qui assurent la congruence articulaire et l'amortissement entre le tibia et le fémur.

En section transversale, les ménisques ont une forme approximativement triangulaire dont le bord externe est plus épais que le bord interne (Fig. 5).

Le ménisque médial possède deux insertions ligamentaires au tibia : crâniale et caudale dans l'aire intercondylienne.

Le ménisque latéral possède trois insertions ligamentaires : une crâniale tibiale et une attache caudale double, au tibia et au fémur.

Le ligament interméniscal relie entre elles les attaches crânielles des deux ménisques. Les ménisques glissent caudalement sur le tibia lors de la flexion du grasset. Leur mouvement est limité par la présence du système ligamentaire qui assure la stabilité passive du grasset.

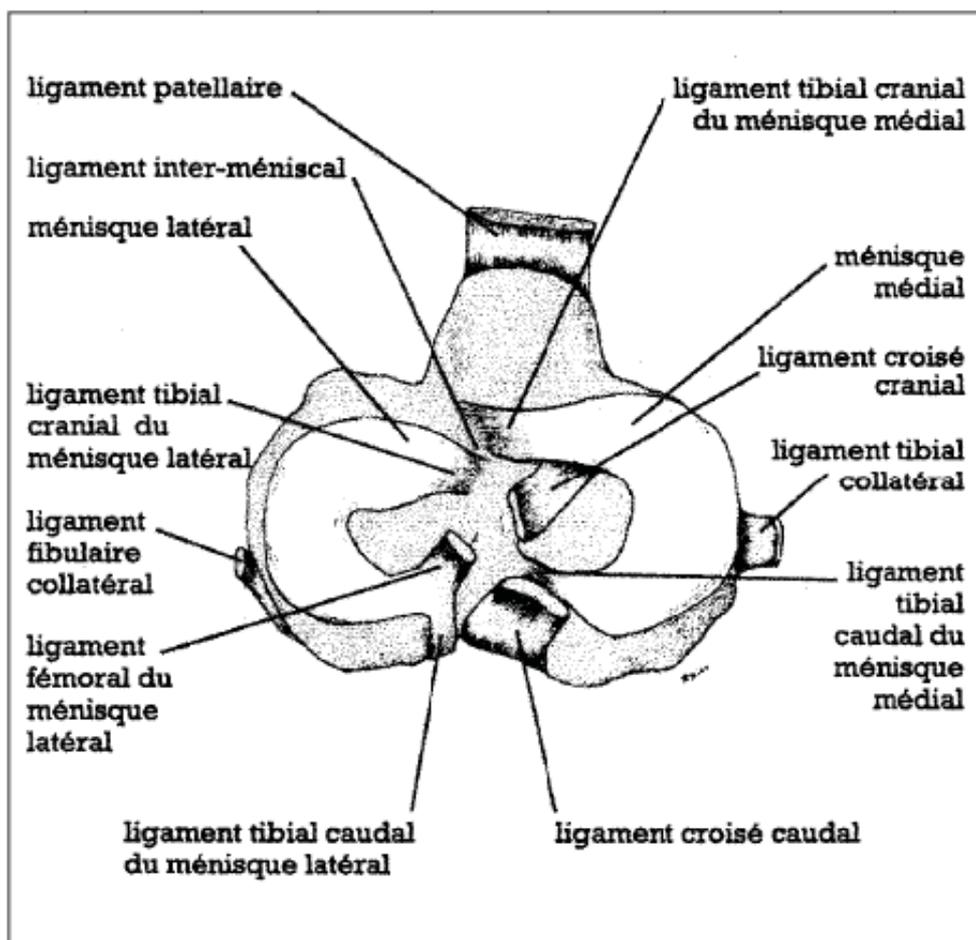


Figure 5 : Vue dorsale de l'extrémité proximale du tibia gauche montrant les ménisques et leurs insertions.

(D'après [5])

#### IV. CAPSULE ET SYNOVIALE ARTICULAIRE

La capsule fibreuse est séparée en deux parties par les ligaments collatéraux médial et latéral : la capsule fémoro-patellaire assez fine, et la capsule fémoro-tibiale augmentée d'une lame fibreuse. La synoviale articulaire forme trois sacs : un sac fémoro-patellaire et deux sac fémoro-tibiaux médial et latéral (Fig 6).

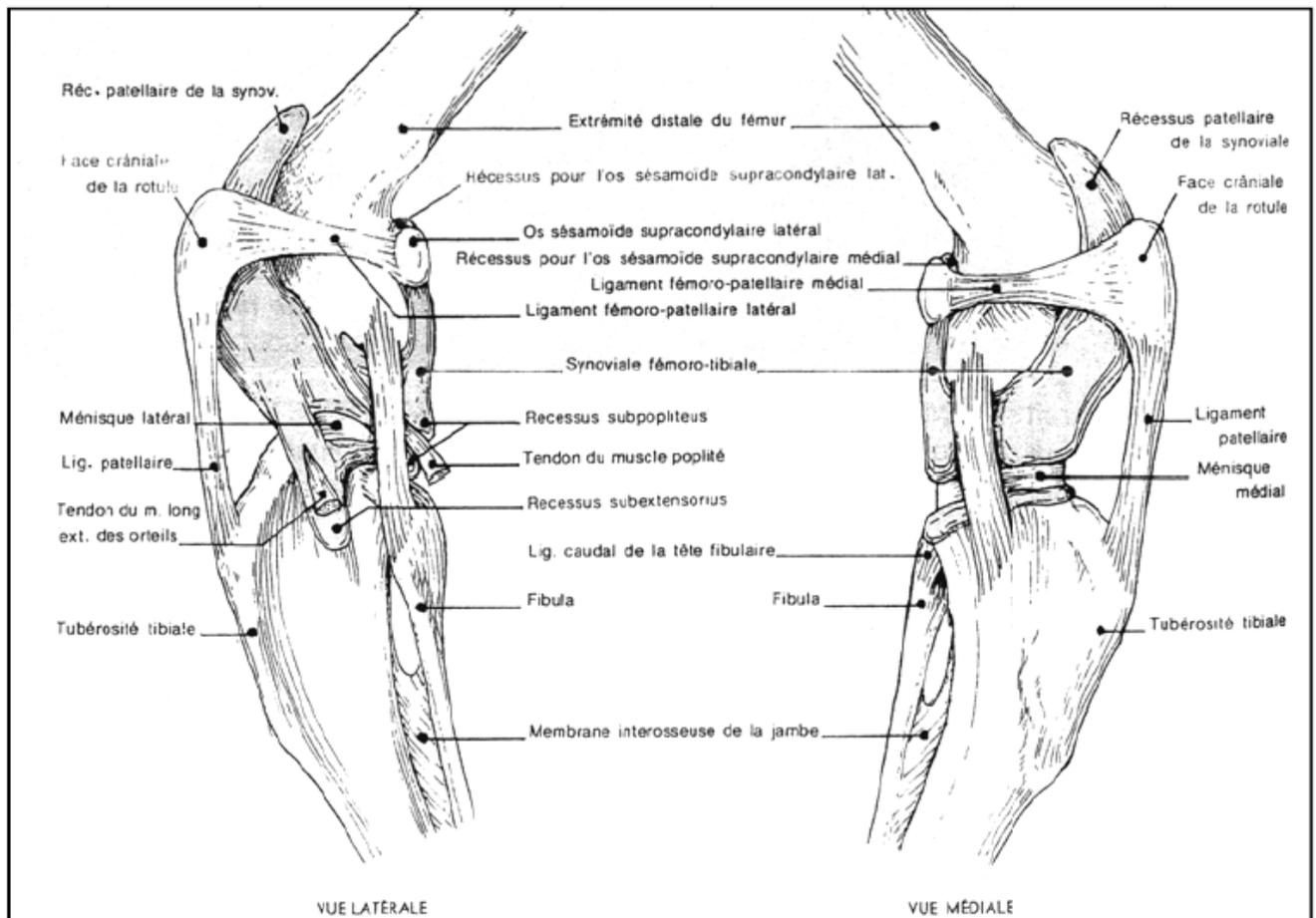


Figure 6 : Vues du genou gauche faisant apparaître la synoviale articulaire. (D'après [5])

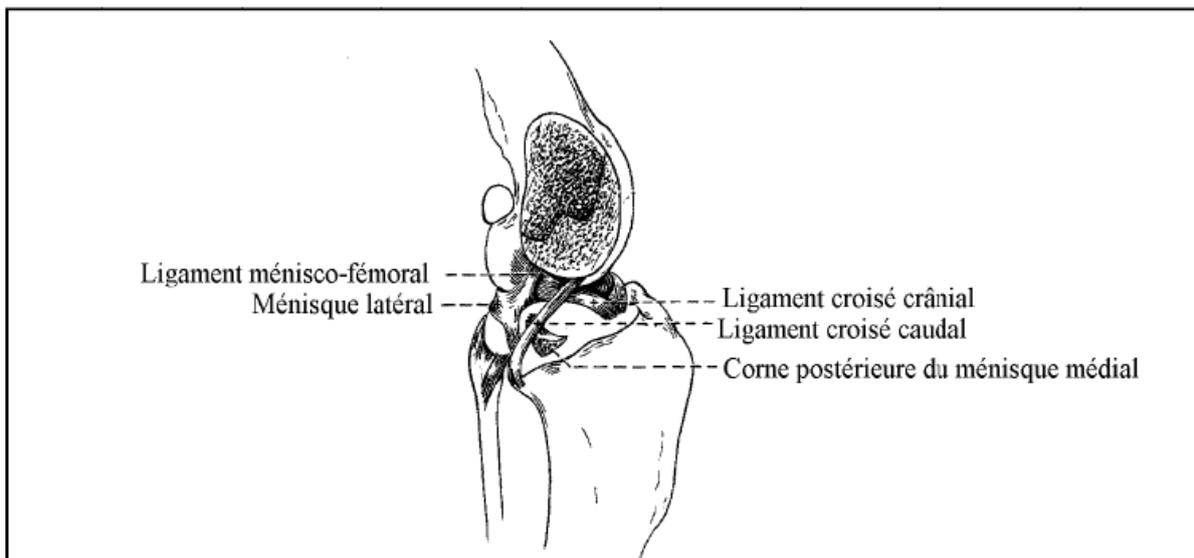
#### V. LIGAMENTS

Le ligament tibio-patellaire prolonge le tendon des muscles quadriceps distalement à la patelle et s'insère sur la tubérosité tibiale.

Les ligaments fémoro-patellaires latéraux et médiaux s'insèrent sur les bords de la patelle et dans les os sésamoïdes supra-condylaires. Ils participent à maintenir la patelle dans la trochlée.

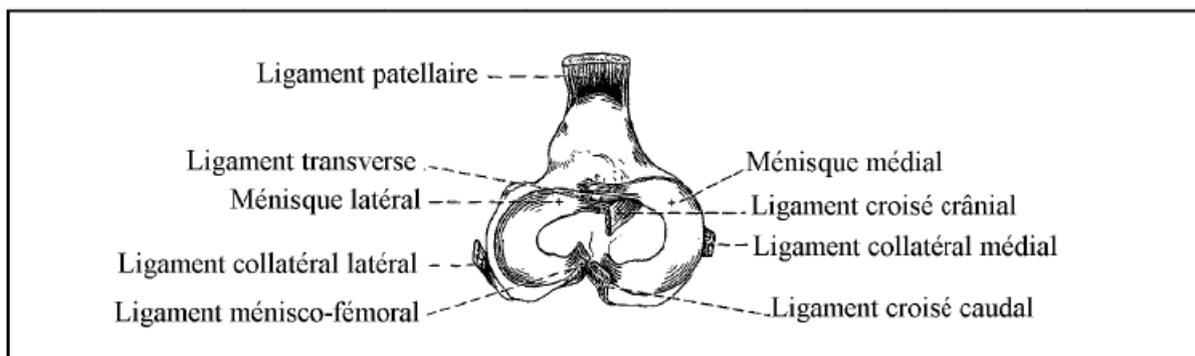
Les ligaments collatéraux prennent naissance sur leurs épicondyles respectifs et se terminent sur l'épiphyse tibiale proximale. Ils assurent la stabilité du grasset en varus, en valgus et en rotation. Le ligament collatéral médial est plus long que le latéral et est intimement lié à la face externe du ménisque médial.

Les ligaments croisés sont deux ligaments intra-articulaires qui relient le tibia au fémur. Le ligament croisé crânial (LCCr) et sa rupture sont l'objet de notre étude. Il s'insère proximement dans la fosse intercondylienne, médialement au condyle latéral du fémur. Il se termine crânialement sur l'éminence intercondylienne du tibia. Il possède une vascularisation propre. Il est composé de deux bandes entrelacées : une bande crânio-médiale et une bande caudo-médiale. Le ligament croisé caudal (LCCd) croise le ligament croisé crânial en prenant naissance médialement dans la fosse intercondylienne et en se terminant dans l'incisure poplitée (Fig 7 et 8).



**Figure 7 : Vue médiale des ligaments croisés d'un genou gauche.**

*(D'après [5])*



**Figure 8 : Vue dorsale des ligaments croisés.**

*(D'après [5])*

## **B. ETIOPATHOGENIE DE LA RUPTURE DU LCCR**

### **I. EPIDEMIOLOGIE**

La rupture du LCCr peut être de deux origines: traumatique ou dégénérative, les deux étiologies étant parfois mêlées. Dans une étude rétrospective de Drape et al. sur plus de 400 cas en France, l'origine dégénérative est majoritaire avec 77% de ruptures dégénératives contre 23% des cas de rupture traumatique. Dans cette étude, 61 % des chiens ont plus de 6 ans, et 25% des chiens étaient revus pour une rupture bilatérale [17] ( Fig 9).

La pente du plateau tibial a été décrite comme facteur prédisposant à la rupture du LCCr mais sa mesure diffère selon l'opérateur et son implication reste controversée [6,11,21].

Une étude récente sur 219 grassetts implique la conformation de la tubérosité tibiale comme facteur prédisposant à la rupture du LCCr [26]. D'autres études restent nécessaires pour confirmer cette donnée.

CLASSIFICATION ETIOPATHOGENIQUE	TYPE DE RUPTURE	FREQUENCE
Secondaire à un traumatisme direct	Traumatique	4 %
Secondaire à un traumatisme fonctionnel		19 %
Secondaire à une fragilisation des structures articulaires	Dégénératif	44 %
Secondaire à une dégénérescence des structures articulaires		33 %

**Figure 9 : Classification des ruptures du ligament croisé crânial**  
(D'après [18])

## II. PATHOGENIE

La pathogénie de la rupture dégénérative du LCCr implique une usure anormale du LCCr dans l'utilisation normale du grasset par le chien. Elle résulte d'une fragilisation du LCCr d'une part, et d'une mise en tension excessive d'autre part. Une modélisation active du grasset explique une mise en tension excessive durant la marche : une force appelée « poussée tibiale crâniale » résulte des différentes forces appliquées au grasset durant la mise en appui. Le vecteur de cette force appliquée sur le tibia est de direction caudo-crâniale, ce qui explique la mise en tension du LCCr durant la marche.

Deux théories expliquent cette poussée tibiale :

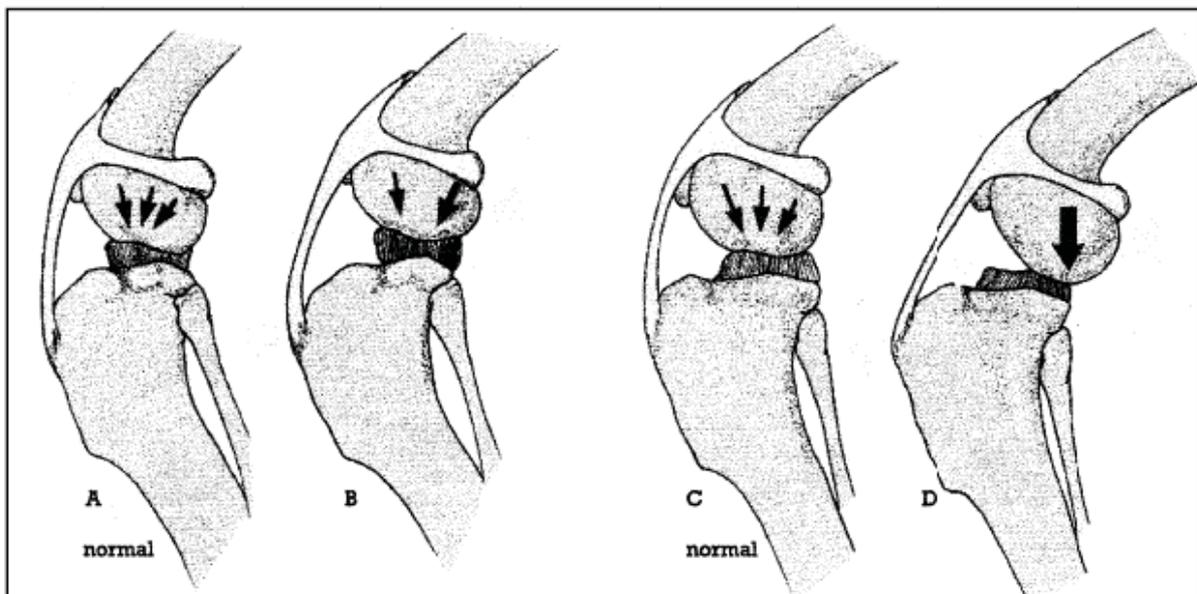
- la première édictée par Slocum [37,38] impute cette force à la pente du plateau tibiale. Le traitement chirurgical consiste donc à annuler cette pente tibiale par ostéotomie correctrice tibiale (TPLO).

- la deuxième proposée par l'équipe de Tepic et Montavon qui considère le quadriceps comme la principale force en jeu dans la poussée tibiale. Le traitement chirurgical est l'avancement de la crête tibiale (TTA) afin d'amener le vecteur tibio-patellaire perpendiculairement au plateau tibial. Selon cette théorie, c'est la conformation de la crête tibiale qui est le facteur principal de rupture de LCCr [26].

La fragilisation du LCCr est démontrée par des modifications histologiques du LCCr chez le chien âgé plus de 5 ans et pesant plus de 15 Kg : les fibres de collagène apparaissent désorganisées et les fibroblastes disparaissent [43]. Cette fragilisation pourrait être due à un défaut d'apport vasculaire au centre du ligament puisque sa vascularisation est périphérique.

La rupture partielle ou totale du LCCr génère une instabilité du grasset crânio-caudalement et en rotation. Celle-ci provoque une inflammation articulaire avec une synovite, et à terme une entésophytose et une ostéophytose.

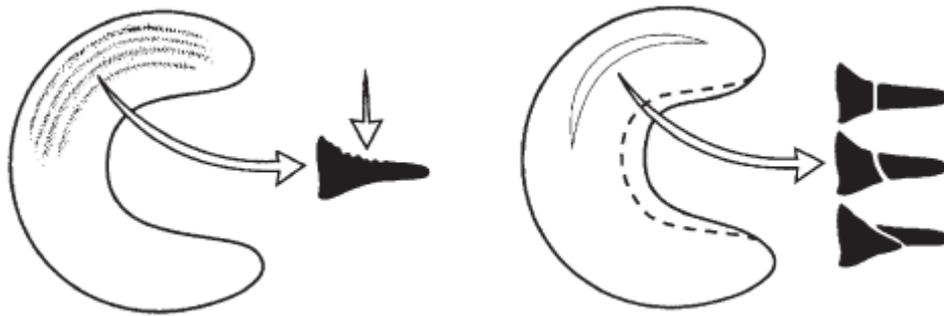
L'avancée du tibia par rapport au fémur sollicite la corne caudale du ménisque médial. Des lésions du ménisque médial sont fréquentes lors de ruptures du LCCr. On observe plusieurs types de lésions (Fig. 10 et 11) . Les plus communément décrites sont les lésions longitudinales ou en anse de panier, les retournements de la corne caudale, et les écrasements du ménisque médial.



**Figure 10 : Mécanisme des lésions du ménisque médial**

- A- Aspect latéral normal de l'articulation**
- B- Aspect latéral de l'articulation lors de mouvement de tiroir antérieur : la surface portante du ménisque latéral est encore maximale**
- C- Aspect médial normal de l'articulation**
- D- Aspect médial de l'articulation lors du mouvement de tiroir postérieur : la surface portante se situe au niveau de la corne postérieure du ménisque médial et l'écrase**

*(D'après [1])*



**Figure 11 : Représentation schématique des deux principales lésions méniscales : à gauche un écrasement de la corne caudale et à droite une lésion longitudinale dite « en anse de panier » .**  
*(D'après [33])*

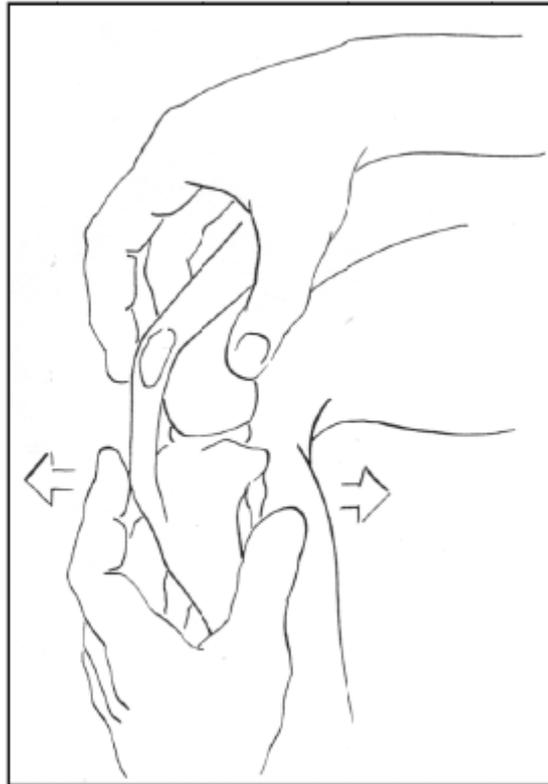
Les lésions méniscales sont réputées algogènes et leur traitement chirurgical est recommandé.

### **III. INTERET DE L'IMAGERIE DANS LA RUPTURE DU LIGAMENT CROISE CRANIAL**

#### **1. AIDE AU DIAGNOSTIC**

Le diagnostic de la rupture du LCCr est principalement clinique. La mise en évidence d'un signe du tiroir direct ou indirect est un signe pathognomonique de rupture du LCCr.

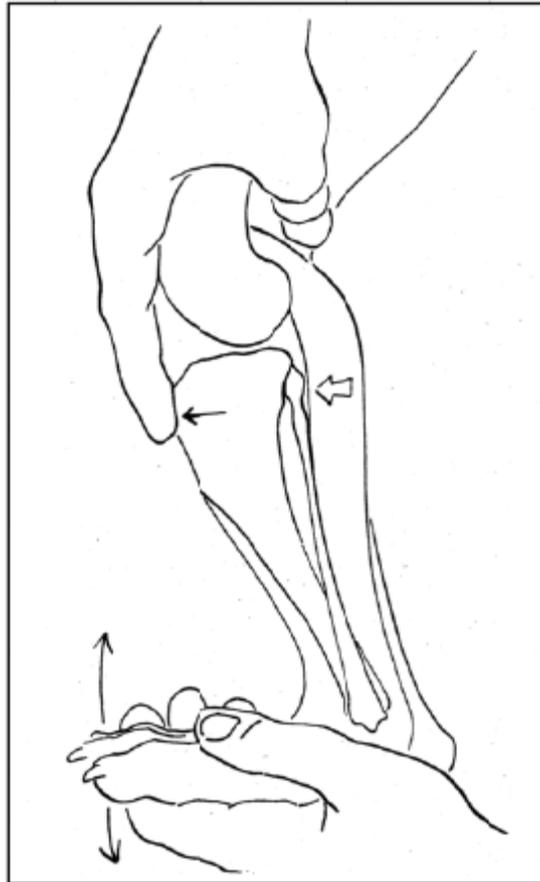
Afin de réaliser le signe du tiroir direct (Fig. 12), il convient de saisir avec une main l'extrémité distale du fémur en mettant le pouce sur les condyles, l'index sur la patelle et l'annulaire sur l'autre condyle. L'autre main saisit l'extrémité proximale du tibia, l'index sur la crête tibiale et l'annulaire sur l'autre face de l'extrémité proximale du tibia. Ensuite, la main tenant le tibia tente de provoquer une avancée du tibia par rapport au fémur sans modifier l'angulation du genou. Ce test doit être réalisé le membre en extension, puis en flexion à 30°. Le test est positif si une avancée de l'extrémité proximale du tibia est constatée. Il signe de façon caractéristique une rupture partielle ou totale du LCCr. Lors de cette manipulation, un claquement ou un ressaut, qui ne sont pas des signes pathognomoniques de rupture du LCCr permettent néanmoins de suspecter une éventuelle lésion méniscale associée.



**Figure 12 : Signe du tiroir direct**

*(D'après [42])*

L'autre manière de tester la stabilité crânio-caudale du genou est de réaliser le signe du tiroir indirect (Fig. 13). Le genou doit être placé en légère flexion, constante tout au long du test. Une main tient l'extrémité distale du fémur, le pouce et l'annulaire placés sur les os sésamoïdes supracondylaires latéral et médial, et l'extrémité de l'index posée sur la crête tibiale. L'autre main exerce alors une flexion du jarret de manière à induire une tension du muscle gastrocnémien et provoquer, en cas de rupture partielle ou totale de LCCr, une avancée de l'extrémité proximale du tibia par rapport au fémur.



**Figure 13 : Signe du tiroir indirect**

*(D'après [42])*

L'empatement du ligament tibio-patellaire, la modification du compartiment médial du grasset, une amyotrophie du membre concerné et une douleur à l'extension du grasset sont des signes évocateurs de rupture du LCCr.

Néanmoins, si le signe du tiroir est hautement spécifique, il ne montre qu'une sensibilité de 60 % sur animal vigile [8]. Les chiens ne souffrant que d'une rupture partielle du LCCr ne présentent pas toujours d'instabilité clinique du grasset. Une musculature développée nuit également à la mise en évidence d'une instabilité. Pour la réalisation correcte des signes du tiroir direct et indirect, il peut être nécessaire de pratiquer une tranquillisation, voire une anesthésie générale lorsque l'animal est trop stressé, trop contracté ou trop algique.

Des examens complémentaires sont donc souvent utiles pour confirmer le diagnostic. L'examen radiographique est très sensible et très spécifique lors de rupture du LCCr.

L'examen cytologique du liquide synovial et l'arthroscopie sont de bons examens complémentaires mais demeurent plus invasifs.

## **2. DIAGNOSTIC DES LESIONS MENISCALES**

Lors de rupture du LCCr, il convient de détecter et de traiter les lésions méniscales, qui, si elles persistent, perpétuent la douleur et la boiterie. Dans 49 à 70% des cas, des lésions méniscales sont associées [22,31,40] à la rupture du LCCr.

Actuellement, en pratique clinique, les lésions méniscales sont mises en évidence et traitées dans le même temps, durant l'arthrotomie ou l'arthroscopie. Or ces deux interventions sont invasives : l'arthrotomie est réputée arthrogène et son bénéfice dans le traitement des ruptures du LCCr n'est pas démontré hors du traitement des lésions méniscales. L'arthroscopie est moins invasive mais nécessite une anesthésie générale, une préparation chirurgicale du membre et un opérateur qualifié. Sa mise en pratique est donc fastidieuse.

Une détection sensible et non invasive des lésions méniscales permettrait d'étudier la nécessité de l'arthrotomie lors de ruptures non associées à des lésions méniscales. Cela pourrait permettre d'abaisser le taux de morbidité des techniques de stabilisation du grasset par ostéotomie ou avancement de la crête tibiale. En outre, cela réduirait le temps opératoire, la durée de l'anesthésie, et abaisserait le risque septique qui est lié à la durée de l'opération.

## **3. PRISE DE MESURES ET DE REPERES PRE-OPERATOIRES**

L'ostéotomie de nivellement du plateau tibial nécessite la prise de mesure radiographique de la pente tibiale afin d'évaluer la correction à y apporter (voir IERE PARTIE. B. IV. C MESURES RADIOGRAPHIQUES PRE-OPERATOIRES).

La TTA ou avancement de la crête tibiale nécessite d'autres mesures radiographiques afin d'évaluer l'avancement à effectuer.

La prise de ces repères varie sensiblement d'un opérateur à un autre, et d'une technologie radiographique à une autre. Ainsi, les mesures prises sur des radiographies argentiques sont moins précises que celles prises sur les radiographies numériques [6]. Une étude sur la prise de ces repères par l'imagerie de coupe pourrait être intéressante à l'avenir.

## **IV. IMAGERIE DE LA RUPTURE DU LIGAMENT CROISE CRANIAL**

### **1. EXAMEN RADIOGRAPHIQUE**

#### **a. ANATOMIE ET TECHNIQUE RADIOGRAPHIQUE**

L'examen radiographique est classiquement réalisé sous deux incidences : médio-latérale et crânio-caudale (Fig. 14 et 15).



**Figure 14 : Radiographie médio-latérale**  
*(radiographie F. Durieux)*



**Figure 15 : Radiographie caudo-crâniale**  
*(radiographie F. Durieux)*

Physiologiquement, l'examen radiographique met en évidence le fémur, le tibia et la fibula, ainsi que la patelle, les sésamoïdes poplités et gastrocnémiens. On doit également observer le ligament tibio-patellaire, et le coussinet graisseux infrapatellaire, qui est représenté par un triangle radiotransparent caudalement au ligament tibio-patellaire. Les ménisques ne sont pas observables radiologiquement.

## **b. MODIFICATIONS RADIOGRAPHIQUES LIEES A LA RUPTURE DU LIGAMENT CROISE CRANIAL**

Dans tous les cas de rupture du LCCr on observe une augmentation de la masse synoviale, signée par une diminution du triangle radiotransparent qui représente le coussinet graisseux infrapatellaire repoussé par le liquide intra articulaire.

On peut également observer un déplacement crânial du tibia par rapport au fémur, spécialement sur des clichés en stress, lors de rupture complète du LCCr (Fig. 16 et 17).



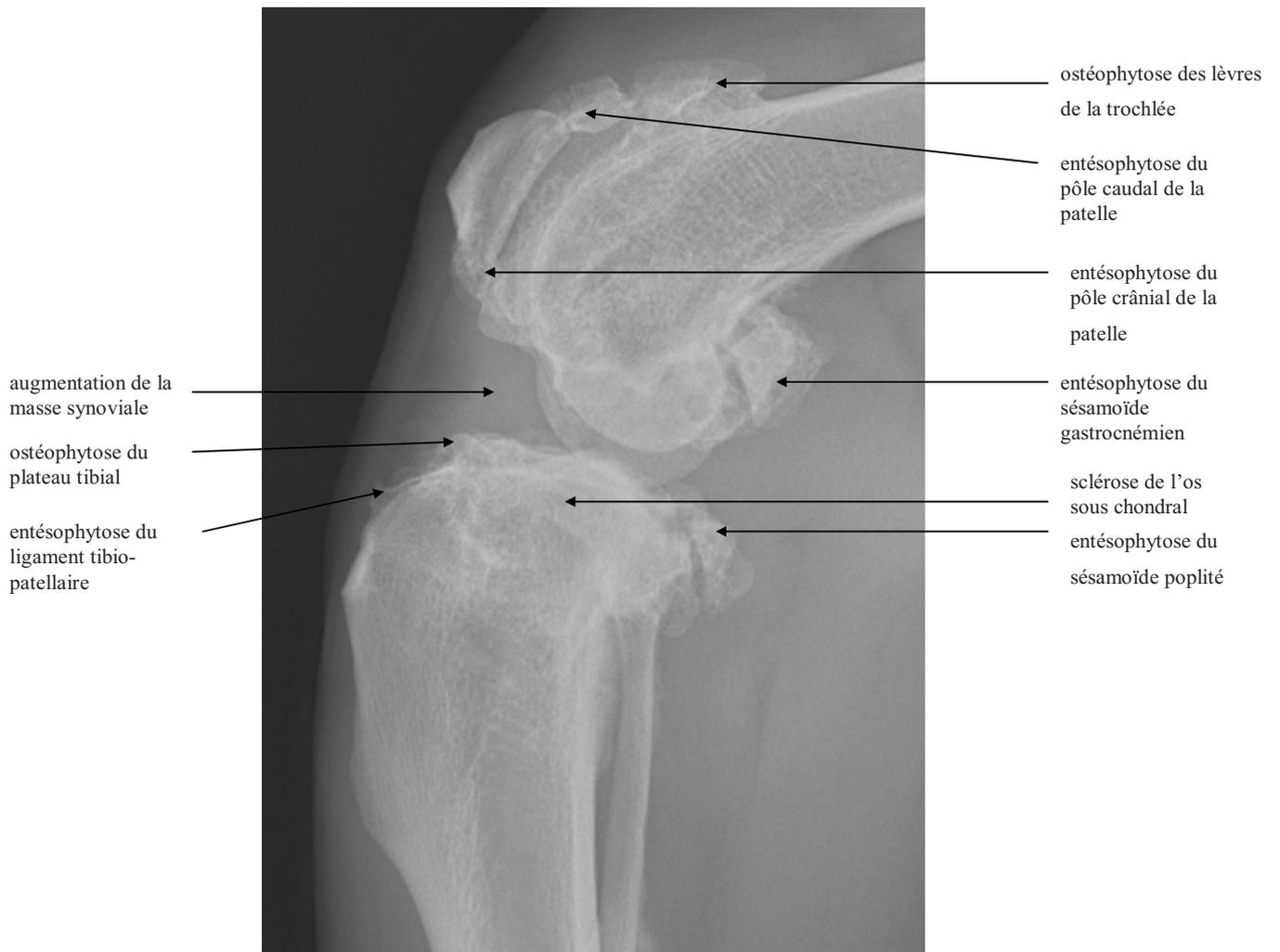
**Figure 16 : Radiographie latérale d'un grasset normal**  
*(radiographie F. Durieux)*



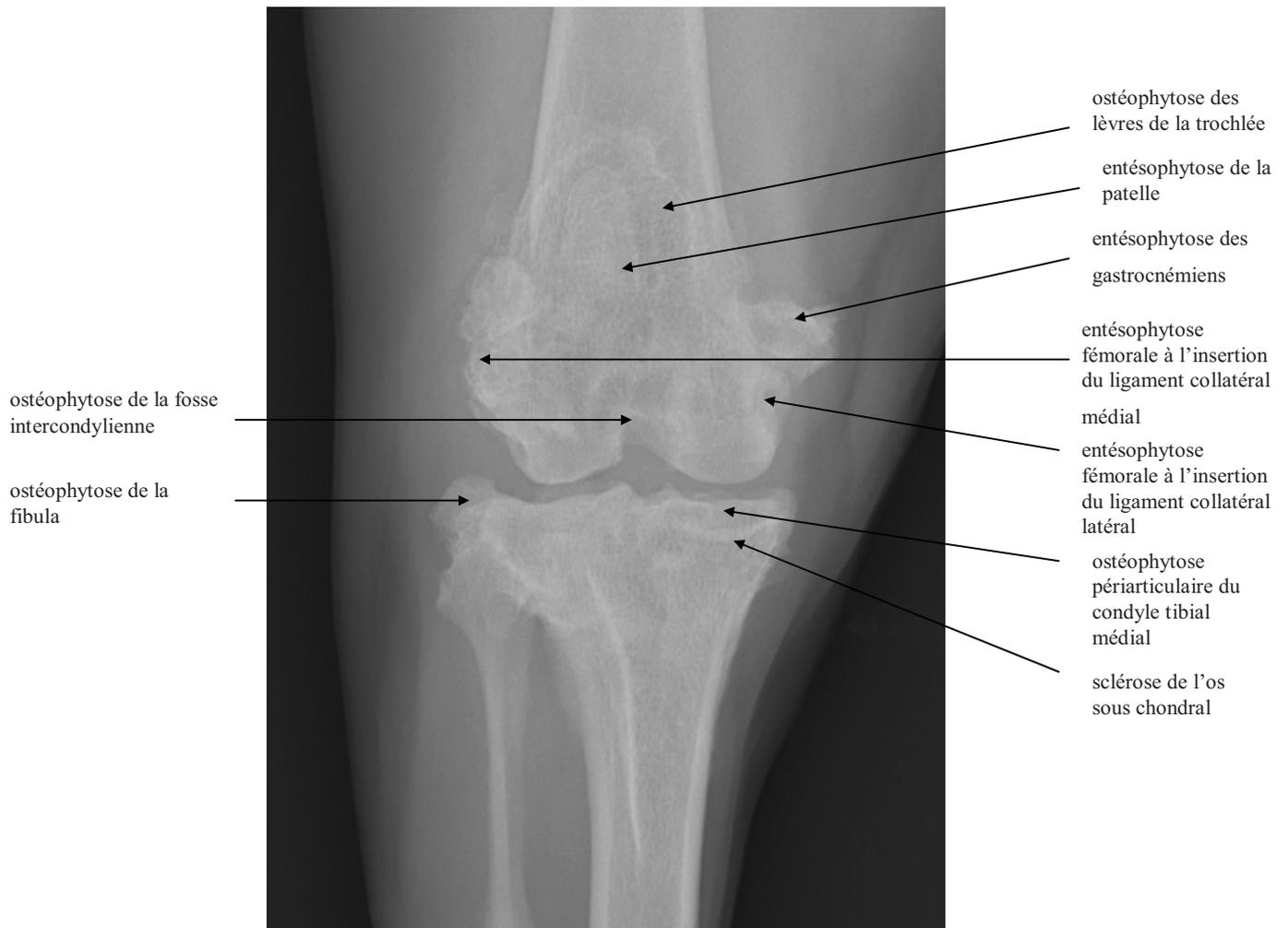
**Figure 17 : Subluxation tibiale crâniale mise en évidence sur une radiographie d'un genou atteint de rupture de LCCr : avancement du tibia par rapport à l'extrémité distale du fémur, le genou étant fléchi à 90°**  
*(radiographie F. Durieux)*

Lorsque la rupture est présente depuis plus de trois semaines, ou lors de rupture partielle du LCCr, on observe une dégénérescence arthrosique de l'articulation dont les signes sont les suivants [25] (Fig. 19 et 20) :

- une ostéophytose périarticulaire des condyles latéraux et médiaux du fémur, et des condyles tibiaux
- une ostéophytose des lèvres de la trochlée
- une ostéophytose de la fosse intercondylienne
- une entésophytose des pôles crâniens et caudaux de la patelle
- une entésophytose des sésamoïdes gastrocnémiens et poplité
- une entésophytose fémorale à l'insertion des ligaments collatéraux
- un déplacement caudal du sésamoïde poplité
- une sclérose de l'os sous-chondral
- la formation de kyste dans l'os sous-chondral.
- l'apparition de corps calcifiés intra-articulaires
- un épaississement des tissus mous péri-articulaires
- un pincement de l'interligne articulaire sur les clichés de face, qui est en faveur de lésions méniscales



**Figure 18 : Radiographie de profil du grasset : modifications radiographiques liées à la rupture du LCCr**  
*(radiographie F. Durieux)*



**Figure 19 : Radiographie de face du grasset : modifications radiographiques liées à la rupture du LCCr**  
*(radiographie F. Durieux)*

L'examen radiographique ne donne que des signes indirects de rupture du LCCr, mais l'accumulation de ces signes en complément de l'examen clinique permet d'atteindre une sensibilité de près de 100% [8].

En revanche, l'examen radiographique ne permet pas d'observer les ménisques. Les lésions méniscales doivent donc être explorées par d'autres moyens.

### **c. MESURES RADIOGRAPHIQUES PRE-OPERATOIRES**

La mesure radiographique de la pente du plateau tibial est nécessaire à la planification d'une ostéotomie de nivellement du plateau tibial (Fig.20).

Sa mesure doit être idéalement prise sur des clichés numériques, en prenant pour point de repère le centre du talus et l'éminence intercondylienne pour l'axe du tibia, et les bords crâniens et caudaux du plateau médial pour la pente du plateau tibial.

Les clichés doivent être réalisés parfaitement de profil, avec une bonne superposition des condyles fémoraux. Une mauvaise superposition des condyles fémoraux amène à sur ou sous-évaluer la pente tibiale. Une variabilité de 5° entre les lecteurs est reconnue. Cette variabilité pourrait être réduite par des mesures tomодensitométriques qui ne dépendent pas de la position du membre.

L'axe du plateau tibial est aussi utilisé avec les mêmes repères pour les mesures pré-opératoires d'avancement de la crête tibiale.



**Figure 20 : Mesure d'angle pré- opératoire pour la planification d'une TPLO**  
(D'après [44]) (radiographie F. Durieux)

## **2. EXAMEN ULTRASONOGRAPHIQUE**

### **a. ANATOMIE ET TECHNIQUE ECHOGRAPHIQUE**

Les études concernant l'échographie du grasset du chien sont peu nombreuses, et les protocoles d'examen ultrasonographique du grasset sont dérivés des protocoles de médecine humaine.

L'examen standardisé explore trois compartiments du grasset : le récessus suprapatellaire, et les compartiments latéraux et médiaux du grasset [2,28].

#### **i. L'examen du récessus suprapatellaire**

L'examen du récessus suprapatellaire est réalisé en coupes sagittales et transverses. On peut y observer le quadriceps, son tendon, la patelle et la gouttière trochléenne. (Fig. 21)

#### **ii. L'examen du compartiment infrapatellaire**

L'examen du compartiment infrapatellaire peut être réalisé en coupe transverse et sagittale. On peut y observer le ligament-patellaire, le coussinet graisseux infrapatellaire ainsi qu'une partie du ligament croisé crânial (Fig. 22, 23 et 24).

#### **iii. L'examen du compartiment latéral**

L'examen du compartiment latéral s'effectue en coupes longitudinales, crânialement au ligament collatéral latéral, sur le ligament collatéral, et caudalement au ligament collatéral. On y observe principalement le coussinet graisseux infrapatellaire, le tibia, le fémur et en profondeur le LCCr qui demeure difficile à observer. En effectuant une coupe latérale, on peut observer le tendon du muscle long extenseur des doigts (Fig 25).

#### iv. L'examen du compartiment médial

L'examen du compartiment médial s'effectue en coupe longitudinale (Fig.26). On peut y observer le tibia, le fémur et le ménisque médial, représenté par un triangle hyperéchogène entre le tibia et le fémur.

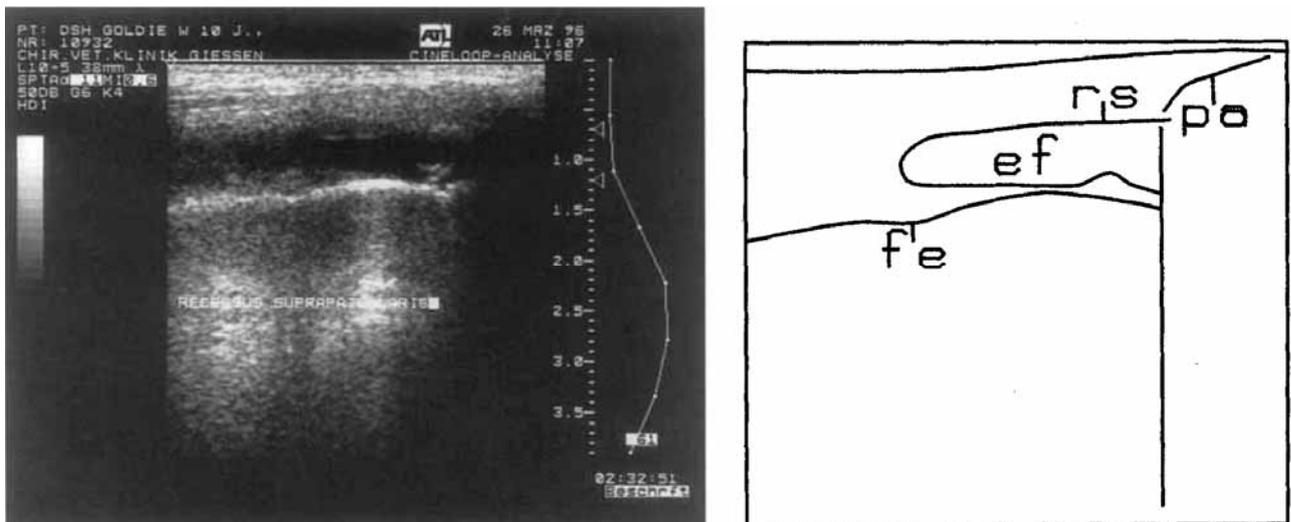
#### b. LESIONS OBSERVABLES LORS DE RUPTURE DU LIGAMENT CROISE CRANIAL

L'échographie permet de mettre en évidence des signes de synovite, marquée par une augmentation liquidienne lors de l'examen du compartiment latéral, avec un coussinet infrapatellaire repoussé.

Les différents examens permettent de mettre en évidence une ostéophytose par une irrégularité sur la forme du tibia ou du fémur.

La rupture du ligament croisé peut être mise en évidence lors de l'examen du compartiment latéral. La rupture est décrite comme une zone anéchogène au sein du ligament. Elle est cependant difficile à observer (Fig. 27).

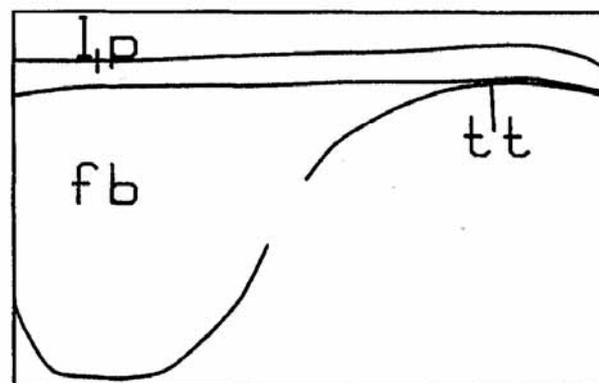
Les lésions du ménisque médial sont observables lors de l'examen du compartiment médial. Une zone hypoéchogène est alors présente au sein du ménisque qui apparaît irrégulier (Fig. 28 et 29).



**Figure 21 : Image suprapatellaire sagittale : effusion liquidienne**

ef = effusion liquidienne ; fe = fémur ; pa = surface de la patelle

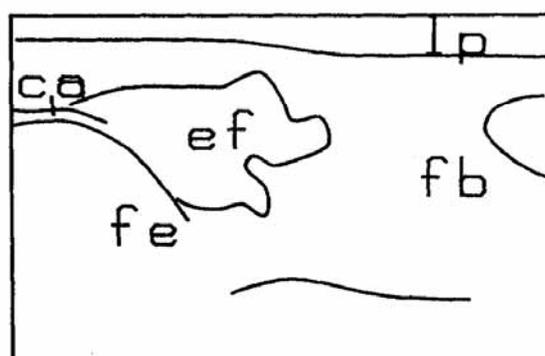
(D'après [28])



**Figure 22 : Image infrapatellaire normale**

fb = coussinet adipeux ; tt = tubérosité tibiale ; lp = ligament tibio-patellaire

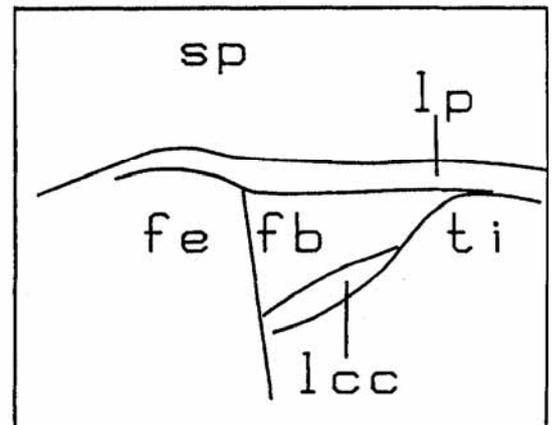
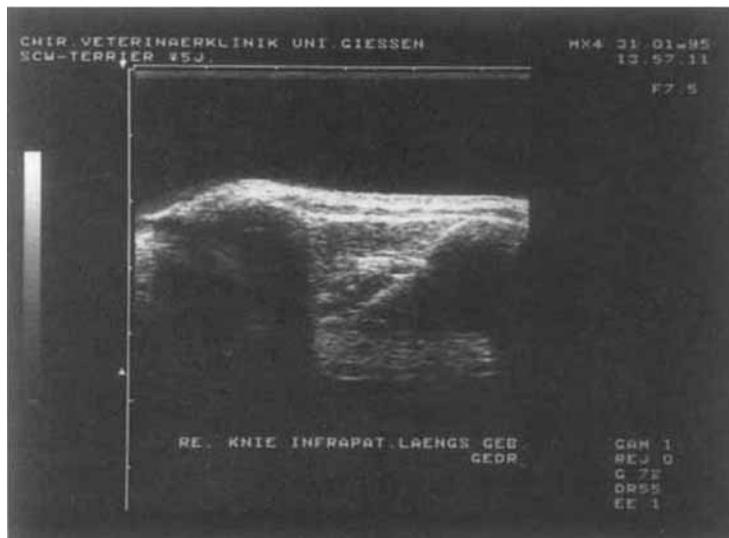
(D'après [28])



**Figure 23 : Image infrapatellaire sagittale : effusion articulaire**

ef = effusion liquidienne ; fb = coussinet adipeux ; ca = cartilage du fémur

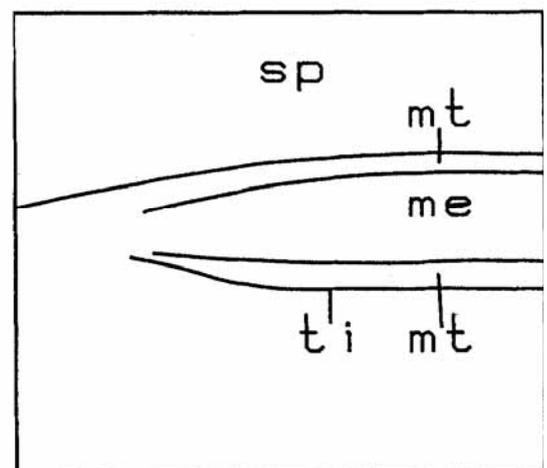
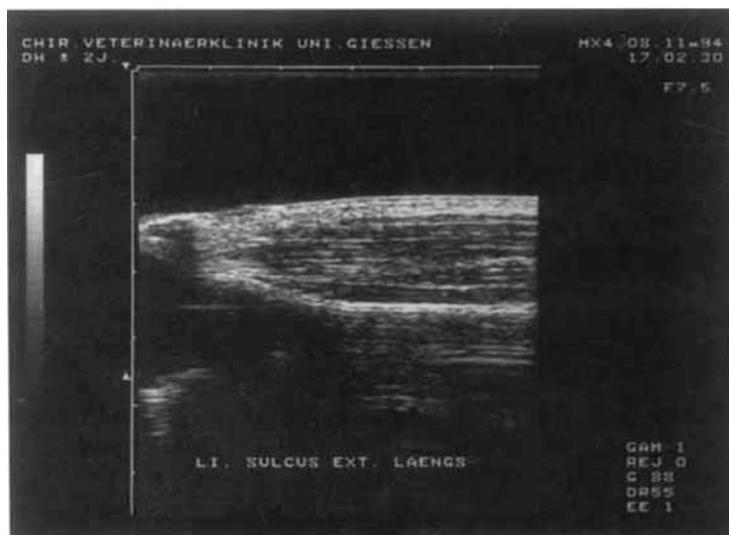
(D'après [28])



**Figure 24 : Image infrapatellaire sagittale : ligament croisé crânial normal**

lcc = ligament croisé crânial ; fb = coussinet adipeux ; fe = fémur ; ti = tibia ; lp = ligament tibio- patellaire.

(D'après [28])



**Figure 25 : Image en région latérale. Image en coupe sagittale.**

me = tendon du muscle long extenseur des doigts ; ti = surface tibiale ; sp = coussin adipeux ; mt = muscle tibial crânial

(D'après [28])



Figure 26 : Région médiale. Image sagittale.

fe = fémur ; me = ménisque médial normal ; ti = tibia

(D'après [28])

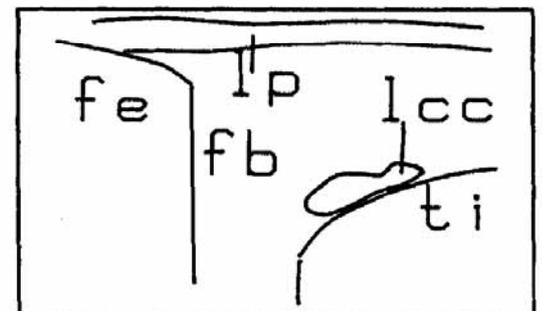
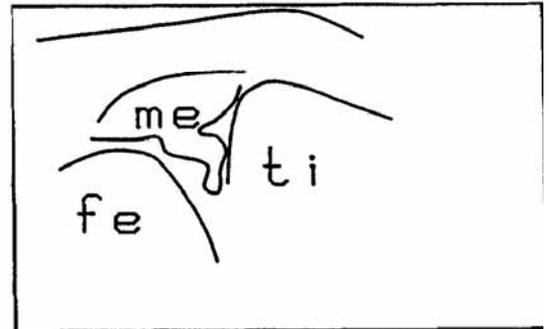


Figure 27 : Image infrapatellaire sagittale : rupture du ligament croisé crânial

lcc = ligament croisé crânial ; fb = coussinet adipeux, fe = fémur ; ti = tibia ; lp = ligament tibio-patellaire

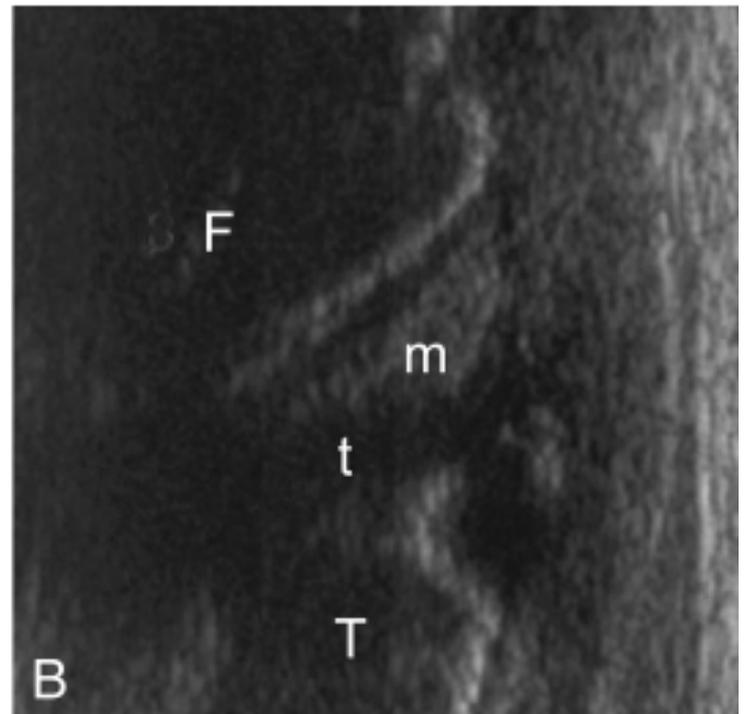
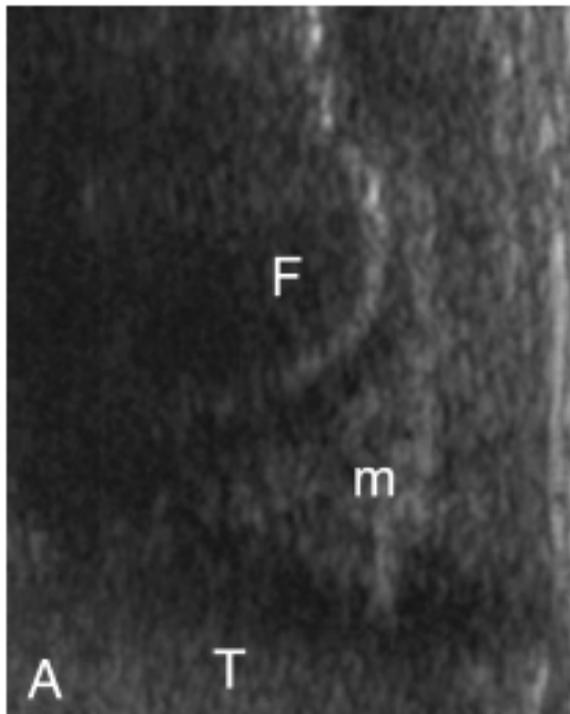
(D'après [28])



**Figure 28 : En région médiale coupe sagittale : dégénérescence du ménisque médial**

fe = fémur ; me = ménisque médial ; ti = tibia

(D'après [28])



**Figure 29 : Comparaison de l'image échographique d'un ménisque sain (a gauche) et d'un ménisque présentant une lésion (à droite)**

On remarque une travée hypoéchogène au sein du ménisque

F = fémur ; t = tibia ; m = ménisque ; t=lésion.

(D'après [28])

### **c. INTERET DE L'EXAMEN ECHOGRAPHIQUE DU LIGAMENT CROISE CRANIAL**

L'examen du grasset présente actuellement un intérêt dans la détection des lésions méniscales. En effet la sensibilité de l'examen se situe entre 82% et 90 % selon les études, et la spécificité au dessus de 92% [2,20,23,28]. Cet examen est fiable, rapide et non invasif et peut se pratiquer sur animal vigile. En revanche, la fiabilité de l'échographie est opérateur-dépendant.

Une détection fiable des lésions méniscales est importante, car elle remet en question l'intérêt d'une exploration chirurgicale du grasset lors d'une intervention de stabilisation. En effet, l'arthrotomie est réputée algogène et arthrogène. De plus elle augmente la durée opératoire, et de ce fait, le risque septique et anesthésique.

La sensibilité de l'échographie dans la mise en évidence des ruptures du LCCr est mauvaise. Elle ne constitue donc pas l'examen de choix pour le diagnostic de rupture du LCCr. Cependant, l'apparition des sondes microconvexes et l'amélioration de la qualité d'image pourraient augmenter la sensibilité de cet examen dans la détection des ruptures du LCCr.

## **3. L'IMAGERIE PAR RESONNANCE MAGNETIQUE**

### **a. ANATOMIE ET TECHNIQUE DE L'IRM DU GRASSET**

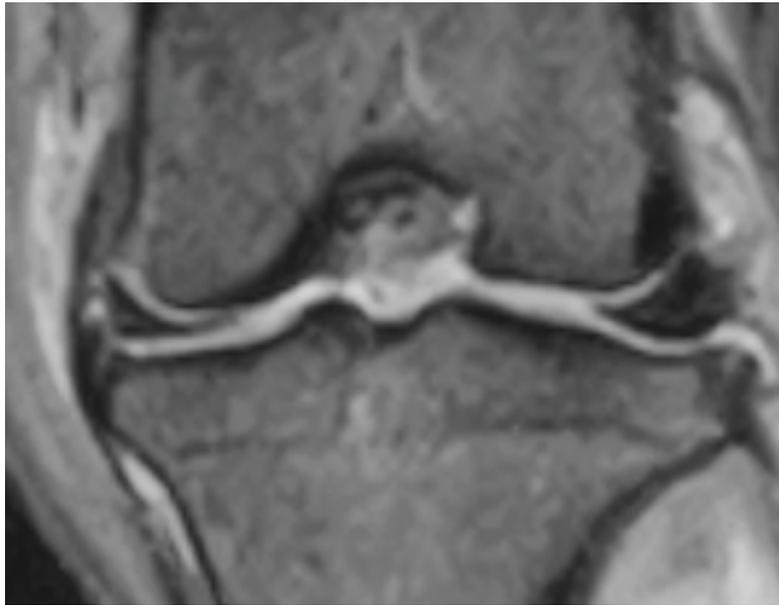
L'imagerie par résonance magnétique est la technique d'imagerie la plus précise pour l'évaluation du grasset. En effet, elle permet une bonne visualisation des structures osseuses ainsi que des tissus mous et des structures fibro-cartilagineuses. Les publications concernant l'IRM du grasset du chien sont peu nombreuses, et les séquences et les coupes utilisées diffèrent d'une publication à une autre.

Toutefois, il est possible de décrire l'anatomie IRM du grasset. La corticale osseuse a un signal homogène noir quel que soit le mode. Le cartilage a un aspect pluri-lamellaire qui diffère selon la séquence utilisée. En mode T1, l'os spongieux a un hypersignal et un signal

intermédiaire en T2. Les ménisques sont globalement en hyposignal, avec des variations selon le signal [3,4,12,30] (Fig. 30 et 31).



**Figure 30 : Image IRM en densité de proton d'un grasset normal**  
Le ménisque (flèche noire ) est en hyposignal. (*D'après [7]*)



**Figure 31 : Image IRM frontale pondérée en T2 d'un grasset sain.**  
Les ménisques sont en hyposignal. (D'après [30])

Le LCCr est une bande homogène en hyposignal. Selon la séquence employée, une structure fibrillaire peut être mise en évidence. Le LCCd présente un hyposignal plus homogène. Les ligaments collatéraux sont en hyposignal ainsi que les tendons. Le coussinet adipeux est en hypersignal en T1. On peut également observer le LLCr après injection de gadolinium (Fig 32, 33 et 34).

L'image IRM est mieux évaluée en coupe sagittale et coronale.



**Figure 32 : Image IRM pondérée en T1 d'un grasset normal**  
Le ligament croisé crânial est observé complètement. (D'après [3])



**Figure 33 : Image IRM sagittale pondérée en T2 d'un grasset sain**  
Le LCCr est en hyposignal (flèche blanche). (*D'après [4]*)



**Figure 34 : Image IRM sagittale pondérée en T1 d'un grasset après injection de gadolinium.**  
Le LCCr apparaît en contraste avec le gadolinium qui est en hypersignal. (*D'après [4]*)

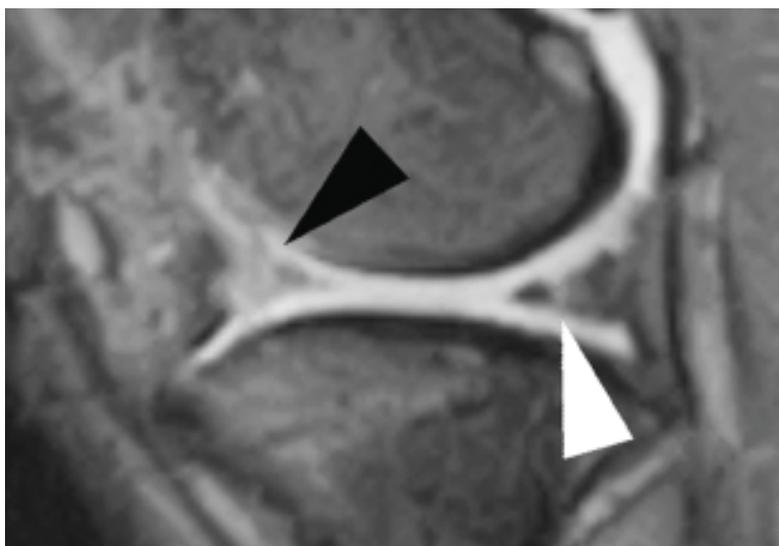
## **b. IMAGE IRM SUITE A LA RUPTURE DU LIGAMENT CROISE CRANIAL**

L'IRM permet d'observer directement les lésions du LCCr (Fig. 35 et 36). Les ruptures totales sont visibles par une solution de continuité du ligament et un aspect globulaire de celui-ci crânialement. Un œdème intense peut venir remplacer le ligament. Les ruptures partielles sont difficiles à observer [12,30].

Des signes indirects existent, comme une modification du signal osseux fémoral et tibial, une effusion articulaire, des signes d'arthrose ou des lésions méniscales.

Les lésions méniscales sont importantes à rechercher car leur traitement est recommandé. Le mode présentant le meilleur contraste pour déceler les lésions du ménisque médial est le mode T2. Les lésions observées sont des hypersignaux verticaux au sein du ménisque (Fig. 37 et 38). On peut parfois observer un retournement de la corne caudale du ménisque médial. Les lésions en anse de seau sont difficiles à reconnaître.

Une étude sur l'IRM du grasset après injection de gadolinium chez le chien montre des images plus contrastées et d'interprétation plus facile [4]. La mise en évidence de liquide sous le ménisque ou au sein du LCCr permet de suspecter des lésions partielles et des luxations intermittentes de la corne caudale du ménisque, qui sont à rechercher.



**Figure 35 : Image IRM sagittale pondérée en T2 d'un grasset 6 mois après rupture du LCCr**  
Les ménisques sont en hyposignal. (D'après [30])



**Figure 36 : Image IRM sagittale pondérée en T2 d'un grasset présentant une rupture partielle du LCCr**  
Le LCCr apparaît épaissi, avec un signal augmenté et irrégulier. (*D'après [4]*)



**Figure 37 : Image IRM sagittale pondérée en T1 d'un grasset présentant une lésion méniscale.**

Un hypersignal apparaît au sein de la forme triangulaire classique de la corne postérieure du ménisque.

*(D'après [4])*



**Figure 38 : Image IRM en densité de proton d'un grasset présentant une lésion méniscale**

Le ménisque en hyposignal est traversé par une ligne en hypersignal (flèche blanche).

*(D'après [7])*

### **c. INTERETS ET LIMITES DE L'EXAMEN IRM DANS LA RUPTURE DU LIGAMENT CROISE CRANIAL**

L'IRM présente plusieurs intérêts lors de rupture du LCCr. Il permet de visualiser le LCCr et déceler une rupture avec une sensibilité de 100% et une spécificité de 80% [27]. La rupture partielle est difficile à diagnostiquer.

Il permet en outre de déceler des lésions méniscales avec une sensibilité de plus de 90% et une spécificité de plus de 90% [27]. Il permet aussi une meilleure appréciation des lésions des tissus mous péri articulaires.

En revanche son intérêt est pour le moment limité, compte tenu des contraintes dues à son utilisation. En effet, les IRM vétérinaires actuelles présentent des temps d'acquisitions trop long, l'examen pouvant durer plus d'une heure. De plus, le manque de disponibilité de la technologie et son coût limitent son utilisation. En outre, les appareils bas champ utilisés en

médecine vétérinaire sont souvent limités par la résolution spatiale et le bruit important des images dû à un manque d'intensité du signal : la qualité des images est donc très inférieure à celle fourni par des appareils à haut champ, alors même que les articulations de chien sont généralement de plus petite taille.

## **2ème partie : ETUDE DE LA TOMODENSITOMETRIE**

# **A. LE PRINCIPE DE LA TOMODENSITOMETRIE**

## **I. INTRODUCTION**

La tomodensitométrie date de 1963 pour son élaboration théorique avec A.M. Cormack. En 1971, G.M. Hounsfield décrit une nouvelle technique d'imagerie médicale qu'il nomme « computerized transverse axial scanning », traduit en français en « scannographie » ou encore « tomodensitométrie », « scanner » en langage courant, et réalise le premier scanner crânien en hôpital [36].

Le même principe physique que la radiographie est utilisé : l'atténuation de l'intensité d'un faisceau de rayons X lors de son passage à travers un corps en fonction de son épaisseur et de sa densité [16]. Le moyen d'enregistrement diffère, il ne s'agit plus d'un film ou d'un amplificateur de luminance mais de capteur hautement sensible.

En radiologie classique, le faisceau de rayons X projette sur une plaque radiographique les ombres des organes traversés en les confondant. Les zones entourées par des tissus plus denses (comme les os) ne sont donc pas visibles. Le scanner pallie cet inconvénient : il permet de visualiser tous les éléments profonds de l'organisme. Son principe est en effet de choisir un plan de coupe et d'effectuer de multiples projections sous différents angles afin de connaître le coefficient d'atténuation en chaque point du plan. L'image est ensuite reconstruite à l'aide d'un ordinateur et visualisée. L'acquisition de plusieurs coupes adjacentes permet une visualisation tridimensionnelle.

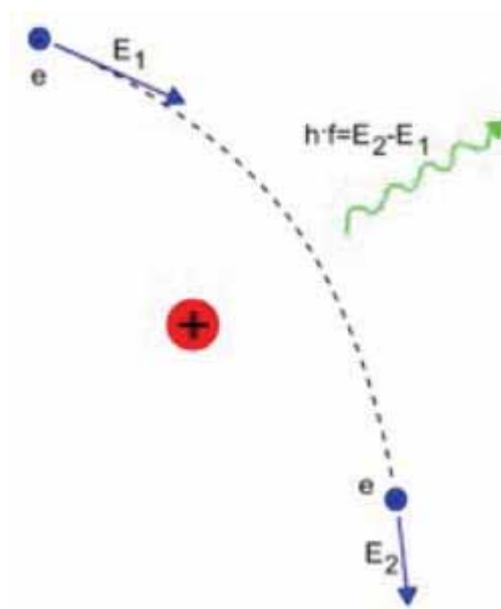
## **II. MECANISMES PHYSIQUES**

Les rayons X sont des rayonnements électromagnétiques a particulaires. Ils se déplacent sous la forme d'une combinaison d'un champ électrique et d'un champ magnétique perpendiculaires l'un à l'autre, en phase et dont l'intensité varie suivant une fonction sinusoïdale [32]. Les ondes électromagnétiques se déplacent en ligne droite dans le vide ou la matière avec une vitesse constante dans le même milieu. Elles se caractérisent par une longueur d'onde très courte ( $10^{-8}$  centimètres) et une amplitude [19]. Les rayonnements très

pénétrants traversent la matière de manière différente selon la densité de celle-ci de par les interactions possibles entre les ondes et les atomes des différents milieux traversés, à l'origine des effets biologiques nocifs.

Un générateur formé d'un filament porté à incandescence, qui constitue la cathode, produit des électrons envoyés à grande vitesse dans le vide sur une cible en métaux lourds, l'anode, grâce à l'application d'une forte tension entre la cathode et l'anode. Cela constitue un faisceau de rayons X dont le spectre résulte de la superposition d'un spectre continu et d'un spectre de raies [32].

Le spectre continu des rayons X correspond aux interactions des électrons avec les noyaux de la cible : il s'agit du rayonnement de freinage (Fig. 39). En effet, les électrons accélérés, lorsqu'ils passent à proximité des atomes des noyaux de la cible chargés positivement, sont déviés et accélérés, ce qui a pour effet de leur faire émettre un photon.



**Figure 39 : Illustration du phénomène de freinage**

(D'après [35])

Selon la distance entre l'électron et le noyau de la cible, des photons X d'énergie variable et principalement de la chaleur seront produits.

Soit  $\phi$  le flux total de rayonnement émis,  $i$  l'intensité du courant en Ampères,  $Z$  le numéro atomique du noyau de la cible et  $V$  la différence de potentiel en Volts :

$$\phi = k.i.Z.V^2$$

Ainsi, le flux est plus intense quand l'intensité  $i$  augmente et quand la différence de potentiel  $V$  augmente, les rayons émis sont alors plus énergétiques et pénétrants. La quantité de rayons X est inversement proportionnelle à leur énergie.

La quantité d'énergie ( $E$ ) transportée par les rayonnements électromagnétiques est proportionnelle à la fréquence de l'onde électromagnétiques ( $\nu$ ) :  $E=h\nu$  avec  $h$  la constante de Planck ( $6.62 \cdot 10^{-34}$  Js). L'énergie des rayons X dépend également de la vitesse des électrons en ms, de l'attraction du noyau (c'est-à-dire de  $Z$  le nombre de protons) et de la distance entre l'électron et le noyau ( $m$ ).

Le spectre de raies est moins important pour la production de rayons X. Il résulte de l'éjection d'un électron d'une couche profonde de la cible par un électron émis par la source et accéléré : il y a ionisation de la cible. L'atome est alors instable, ionisé ou excité suivant l'énergie de l'électron incident, et il retournera à un état d'équilibre en émettant des photons : c'est la fluorescence [32]. Etant donné que les raies sont caractéristiques des constituants de la cible, ce spectre peut être utilisé à l'identification de ceux-ci.

### **III. EFFETS PHOTOELECTRIQUE , COMPTON ET THOMSON**

Ces trois effets correspondent aux différentes façons qu'ont les rayons d'interagir avec la matière et déterminent l'atténuation du faisceau incident de rayons X. L'atténuation est d'autant plus importante que le numéro atomique des éléments traversés est élevé, que la densité et l'épaisseur du milieu traversé sont conséquentes et que l'énergie du faisceau incident de rayons X est faible.

#### **1. EFFET PHOTOELECTRIQUE**

L'effet photoélectrique est l'émission d'électrons par la cible, lorsque le photon interagit suffisamment avec l'électron d'une couche interne de l'atome pour l'éjecter, les électrons de l'atome se réorganisent alors pour remplir les couches les plus internes de l'atome désorganisé. Il y a alors émission de photons par l'atome d'autant plus absorbés par le

corps à radiographier que le numéro atomique de l'atome est élevé (cet effet est responsable du contraste radiographique) et que l'énergie des photons émis par la source est faible. Cet effet est donc le principal effet rencontré quand les rayons X sont peu pénétrants. La quantité de rayons X stoppés détermine le niveau de gris visible sur le cliché radiographique.

## 2. EFFET COMPTON

Le photon incident interagit encore avec un électron mais celui-ci a une énergie de liaison beaucoup moins forte que celle impliquée dans l'effet photoélectrique. L'effet Compton concerne des électrons moins liés, voire libres. Lorsqu'un photon émis par la source à haute énergie entre en collision avec un électron, une partie de l'énergie du photon est transférée à l'électron (Fig. 40). Comme il possède moins d'énergie, il y a diffraction du photon qui présente alors une longueur d'onde supérieure. Cet effet produit le rayonnement diffusé qui diminue le contraste du cliché et contre lequel il est nécessaire de se protéger lorsque l'on réalise des manipulations en radiologie.

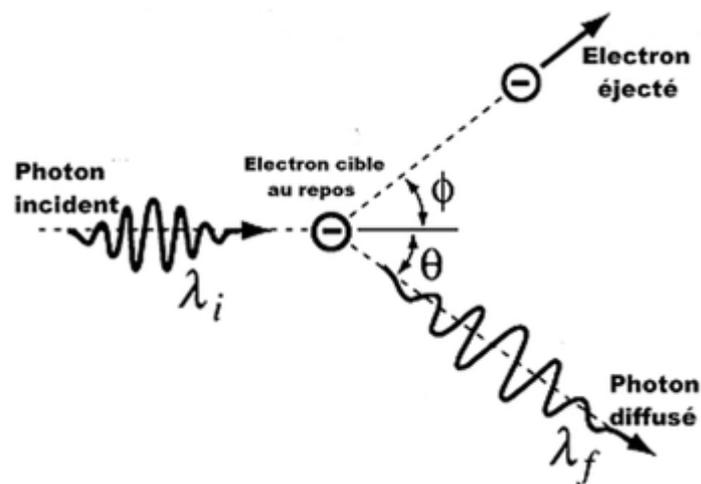


Figure 40 : Schéma de la diffusion Compton  
(D'après [35])

### **3. EFFET THOMSON**

L'effet Thomson correspond à la diffusion du photon incident après interaction avec un électron du milieu sans perte d'énergie. Il est négligeable par rapport aux deux effets décrits précédemment et diminue lorsque l'énergie du photon incident augmente. Il correspond aux parties les plus radiotransparentes du cliché radiographique.

## **IV. FORMATION DE L'IMAGE DE TOMODENSITOMETRIE**

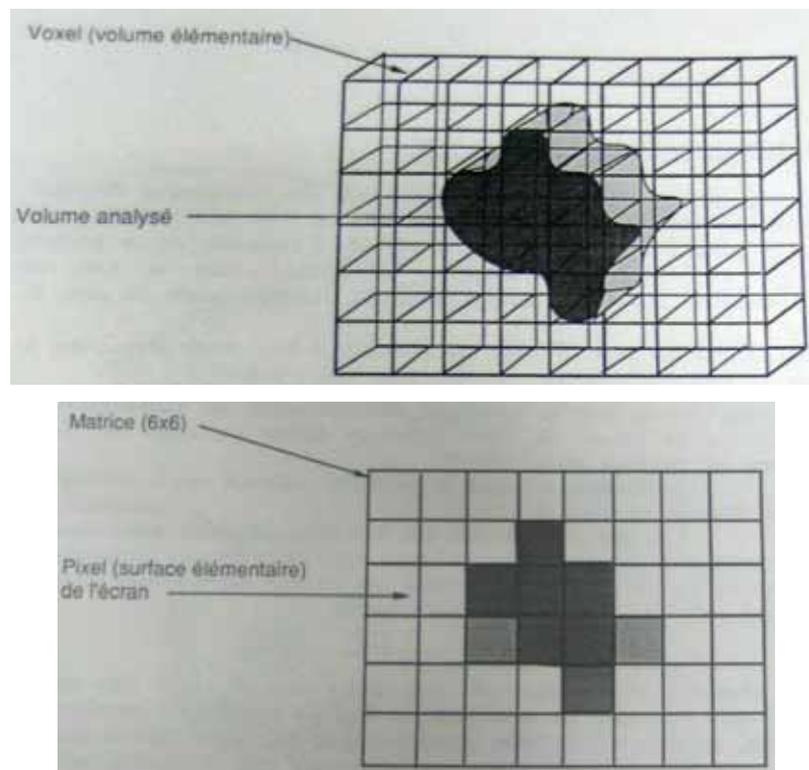
### **1. LES MESURES**

L'image scanographique est formée par les différences d'atténuation du faisceau incident de rayons X dans les milieux traversés [19,29]. Au cours de la réalisation d'un cliché, le couple tube à rayons X – détecteurs (détecteur de référence pour la mesure du flux entrant et détecteur de mesure pour le flux sortant) effectuent une rotation de 360° pendant laquelle un nombre important de mesures d'atténuation des rayons X par un objet sont enregistrées. A chaque position du faisceau, les détecteurs relèvent la quantité de rayons X qui ont traversés l'objet ou son coefficient d'atténuation. La quantité d'information brute est proportionnelle au nombre de mesures et au nombre de récepteurs. C'est le premier élément de la qualité de l'image.

### **2. LA RECONSTRUCTION**

Des détecteurs électroniques recueillent le rayonnement résiduel après traversée de l'organe à explorer et, par comparaison avec le rayonnement témoin, mesurent l'atténuation des rayons X. L'image de l'objet est découpée en petits éléments de volume élémentaire appelés « voxel ». La taille de chaque voxel est variable : elle dépend de l'épaisseur de la coupe et du nombre de pixels (le pixel est la surface élémentaire : le voxel est égal au pixel multiplié par l'épaisseur de coupe) que l'on différencie sur la coupe. Ces mesures permettent

de déterminer quelle est la participation de chaque « voxel » à l'atténuation globale, ce qui permet ainsi le calcul de la densité de chacun de ces volumes (l'algorithme le plus utilisé est « la rétroprojection filtrée », les projections sont filtrées avant d'être rétrojetées). L'accumulation des densités radiologiques sous différents angles et dans différentes directions permet d'obtenir une coupe imagée dont chaque point est calculé à partir d'un traitement informatique. Cette phase de reconstruction comporte différentes étapes de calculs mathématiques. Les détecteurs convertissent les signaux des rayons X en signaux électriques eux-mêmes convertis en informations numériques exploitables par les programmes de l'ordinateur [36] (Fig. 41).



**Figure 41 : Correspondance entre voxels, pixels et matrice. Mode de représentation des coefficients d'atténuation. (D'après [36])**

### 3. L’AFFICHAGE

L’ordinateur affiche alors l’image sous forme de pixels. A chaque densité correspond une tonalité de gris allant du blanc au noir sur l’écran cathodique. On obtient alors une image de la coupe considérée .

L’ordinateur est capable de distinguer 2000 nuances de densité. Hounsfield les a classées dans une échelle portant son nom, de -1000 (qui correspond à la densité de l’air, en noir sur l’écran) à +1000 (qui correspond à la densité de l’os dense, en blanc sur l’écran), la valeur 0 correspondant à la densité de l’eau (Fig. 42). La graisse est située entre -30 et -100 unités Hounsfield et les parenchymes sont situés entre +30 et +80 unités Hounsfield. Si le faisceau a été fortement atténué, le pixel sera blanc car le corps est radio-opaque, alors que si le signal a été peu atténué le pixel correspondant sera noir, le corps étant radio-transparent.

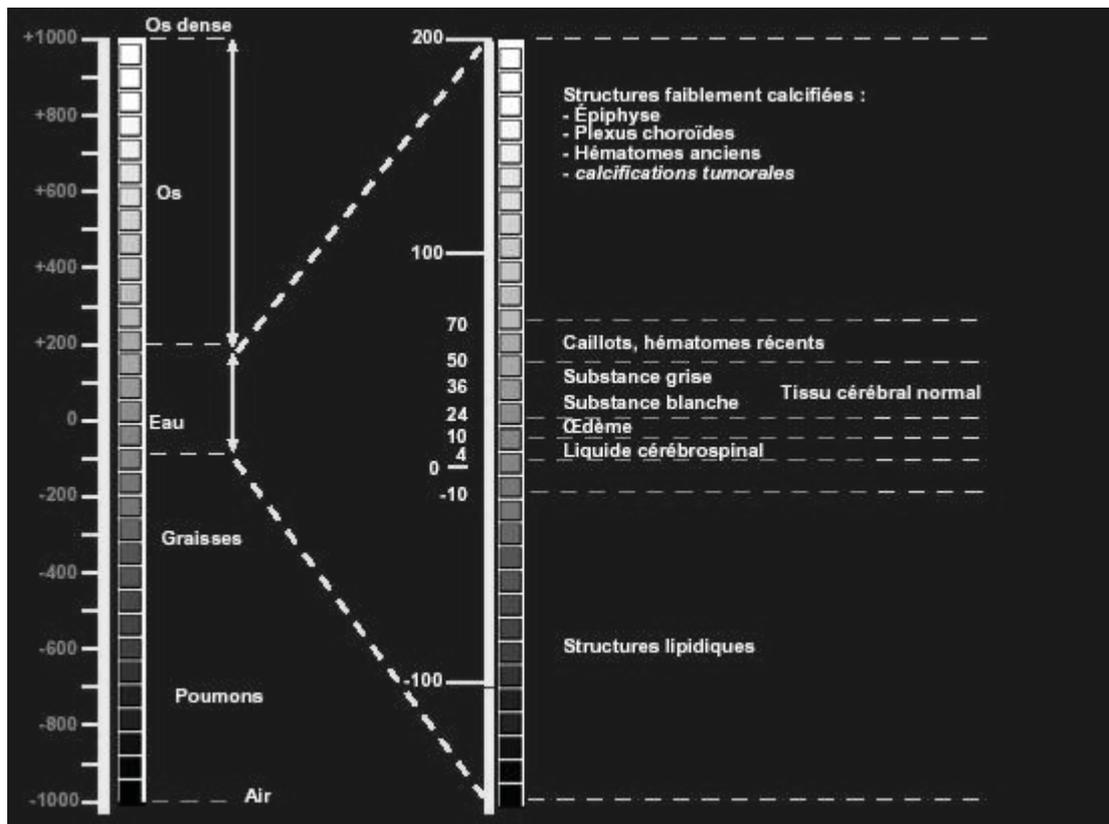
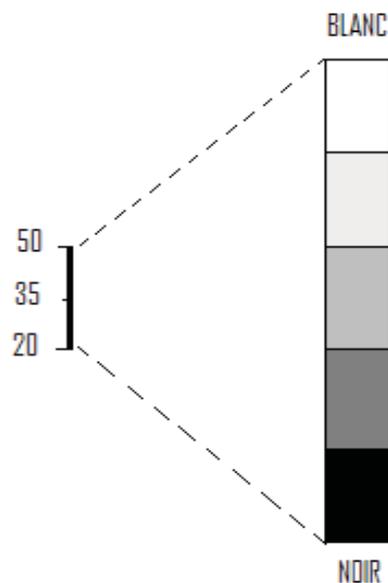


Figure 42 : Echelle de Hounsfield

( D’après [10])

Cette échelle est trop étendue pour l’œil humain qui ne distingue que 15 à 20 nuances de gris. Ainsi, pour ne pas perdre la richesse des informations acquises, il est

nécessaire de ne présenter qu'une partie de l'échelle appelée « fenêtre » et caractérisée par un niveau et une largeur (Fig. 43). Le niveau correspond à la densité sur laquelle on centre l'intervalle, c'est-à-dire la médiane de la fenêtre. La largeur détermine les bornes extrêmes de celle-ci [16,24]. Plus la fenêtre est étroite, plus la discrimination est importante et plus différencier des structures de densités très proches est réalisable. Le niveau détermine la brillance de l'image, la largeur de la fenêtre caractérise le contraste.



**Figure 43 : Notion de fenêtre et de niveau**

*(D'après [39])*

Dans cet exemple, le niveau de la fenêtre choisie est + 35. La largeur de la fenêtre choisie est 30. Ainsi, toutes les valeurs supérieures à + 50 sont confondues dans le blanc et toutes les valeurs inférieures à + 20 sont confondues dans le noir. Le travail d'images peut alors être réalisé grâce à l'enregistrement et au stockage des données, il est ainsi possible d'obtenir de nombreuses images en changeant les caractéristiques de la fenêtre à partir d'une même acquisition. Cela permet de travailler de façon différée à la réalisation de l'examen [14].

On distingue en général deux types de fenêtre : les fenêtres de type « os » qui permettent de repérer les reliefs et la structure du tissu osseux, et les fenêtres de type « tissus mous » destinées comme leur nom l'indique aux organes peu calcifiés. Les fenêtres « os » sont des fenêtres très larges afin de couvrir tous les types d'os. Toute la largeur de l'échelle de Hounsfield est en général choisie. Les fenêtres «tissus mous » sont des fenêtres assez étroites que l'on centre autour du coefficient d'absorption du tissu intéressant.

Enfin, il est possible de retravailler les images, en évaluant le coefficient d'absorption d'une zone intéressante, en mesurant diverses formations, ou bien en faisant des zooms.

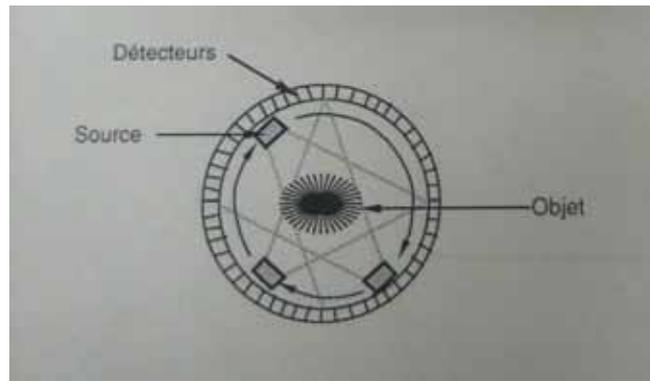
## **B. LE FONCTIONNEMENT DU SCANNER**

### **I. L'APPAREIL**

La source de rayons X est composée par un tube à rayons X semblable à ceux utilisée en radiologie, constitué d'une ampoule d'un verre insensible aux différences de températures et opaques aux rayons X.

La cathode est formée par un filament de tungstène porté à incandescence grâce à un courant de chauffage, ce qui produit les électrons envoyés à grande vitesse. L'anode, c'est-à-dire la cible, est constituée par un alliage de tungstène rhénium et est située dans une pièce de cuivre afin de permettre une bonne évacuation de la chaleur. La tension appliquée pour l'émission des rayons X est de 125kV à 150kV, l'effet Compton est alors prédominant.

Les détecteurs, composés par des multiples cellules côte à côte, captent et enregistrent la quantité de photons qui a traversé le patient. Ces cellules doivent présenter un temps de réponse et une absence de rémanence pour obtenir un grand nombre de mesures donc une bonne résolution temporelle (Fig.44).



**Figure 44 : Principe d'acquisition de l'image et du couple source-détecteur de rayons autour du patient**  
(D'après [36])

Le scanner comporte trois éléments :

- le portique : il s'agit d'un anneau comportant le tube à rayons X et d'un arc de cercle lui faisant face, comprenant les capteurs qui forment un signal électrique proportionnel à la quantité de rayons X reçus. Cet ensemble, pour chaque clichés réalisés, fait une rotation de  $360^\circ$  à une vitesse constante.
- l'ordinateur : il traite les données brutes fournies par les récepteurs du portique et les transforme en images.
- La console : elle permet de choisir les paramètres nécessaires à la réalisation du scanner, de le contrôler et de visualiser les images.

## II. LES REGLAGES DE L'APPAREIL

De nombreux paramètres sont à régler :

- la tension (kV)
- le temps d'exposition (s) : il influe sur la dose de rayons X reçue par le patient
- l'intensité du courant (mA) : elle influe également sur la dose de rayons X reçue par le patient. Le produit de l'intensité par le temps est une constante. Ainsi, en ajustant l'intensité, il est possible de diminuer le temps d'exposition.
- le nombre de coupes et l'espacement entre elles : ces paramètres dépendent de la région à étudier. Le choix de l'espacement des entre les coupes conditionne l'existence

de zones aveugles. Concrètement, les coupes peuvent être séparées par une zone aveugle si la distance entre deux coupes est supérieure à la largeur de la coupe, jointives si l'espacement est égal à la largeur des coupes, ou chevauchantes (overlap) si l'espacement est inférieur à la largeur des coupes.

- la direction des coupes qui peuvent être perpendiculaires au grand axe du patient ou plus ou moins inclinées selon l'orientation du portique
- l'épaisseur des coupes : ce paramètre conditionne les résolutions spatiale et densitométriques, ainsi que l'importance des artéfacts de « volume partiel » (voir 2EME PARTIE.B.IV. QUALITE DE L'IMAGE ET ARTEFACTS). En effet, des coupes épaisses limitent les effets de volume partiel mais la résolution densitométrique est meilleure en coupes fines. Ainsi, le choix de l'épaisseur de coupe est fonction de l'anomalie recherchée.
- le champ : il s'agit du diamètre de la tranche anatomique visualisée sur l'image. Plus le champ est limité, et meilleure sera la définition de l'image.

### **III. DEROULEMENT D'UN ARTHROSCANNER**

L'examen se déroule sous anesthésie générale, car il est nécessaire d'éviter tout mouvement pendant la durée d'acquisition car ils pourraient engendrer des artéfacts.

Après avoir placé l'animal dans la position adéquate, on réalise un ScanPlan ou « scoutview » qui correspond à la réalisation d'un cliché de face ou de profil par balayage dans un plan de l'ensemble de la région d'intérêt. Pour notre étude, les acquisitions sont faites avant et après injection du produit de contraste dans l'articulation.

L'examen dure quelques minutes, pendant lesquels des coupes millimétriques effectuées sont envoyées au fur et à mesure sur la console de visualisation de l'imageur. Celui-ci pourra alors les étudier dans tous les plans de l'espace (sagittal, axial, coronal et oblique) et les retravailler (utilisation de la 3D, du MPR...).

## **IV. QUALITE DE L'IMAGE ET ARTEFACTS**

### **1. GENERALITES**

Le scanner permet d'éviter la superposition des différentes structures sur une seule image par la réalisation de coupes. Comme dans toutes les techniques d'imagerie, l'interprétation des images obtenues doit être précédée par une évaluation de leur qualité, à l'aide de deux critères principaux : la résolution densitométrique et la résolution spatiale.

### **2. RESOLUTION DENSITOMETRIQUE**

Proche de la notion de contraste en radiologie, c'est la capacité de distinguer des structures ayant des densités peu différentes de celles de leur environnement. Elle est proportionnelle à la dose de rayons enregistrée par les récepteurs et par conséquent proportionnelle à la largeur de la coupe.

Le contraste doit permettre d'observer les cinq catégories de radio-opacité : le métal doit apparaître blanc, l'os légèrement moins, l'eau grise, la graisse un peu plus foncée et enfin l'air noir.

### **3. RESOLUTION SPATIALE**

Elle correspond à la capacité de distinguer l'un de l'autre des petits détails de contraste élevé. C'est la netteté en radiologie. Elle est inversement proportionnelle à l'épaisseur des coupes et dépend de la qualité des détecteurs mais aussi de la taille de la zone à observer (la résolution spatiale diminue si la taille de la zone augmente). En tomodensitométrie, la résolution spatiale est très performante de l'ordre du millimètre.

#### **4. ARTEFACTS SCANOGRAPHIQUES**

Ils correspondent à des parasites plus ou moins structurés de l'image construite mais qui n'existent pas au niveau de l'objet, lorsque les valeurs Hounsfield calculées ne correspondent pas à la réalité. Il existe des artéfacts :

- secondaires à des variations brutales de densité du tissu traversé (métal ou os compact vs. liquide ou air),
- liés aux mouvements des objets : c'est le « flou cinétique ». La traversée du patient par les rayons X est perturbée par ces mouvements, surtout aux zones de jonctions de deux milieux très différents,
- liés à un « effet de volume partiel » quand dans un voxel coexistent deux structures de densités très différentes, la valeur Hounsfield calculée sera intermédiaire aux valeurs des deux structures. Cet effet est donc plus marqué lorsque la coupe est épaisse et les milieux en contact très différents,
- liés au durcissement du rayon au cours de la traversée de structures très opaques (prothèse orthopédique par exemple) qui apparaîtront entourées d'opacité en étoile : il s'agit d'une « image en étoile » ou « beam-hardening »,
- circulaires liés à un mauvais calibrage de la machine.

#### **V. UTILISATION DE PRODUITS DE CONTRASTE**

Tous les produits de contraste iodés hydrosolubles sont construits à partir d'un noyau de benzène auquel sont attachés trois atomes d'iode. En tomodensitométrie des articulations, les produits de contraste sont utilisés pour surligner les contours, mettre en évidence des déformations, ainsi que pour visualiser toutes les structures radio-transparentes présentes à l'intérieur de la cavité articulaire, donc non visibles à l'examen tomodensitométrique conventionnel.

**3ème partie : ETUDE**  
**TOMODENSITOMETRIQUE DU GRASSET**

## **A. LES IMAGES TOMODENSITOMETRIQUES SANS INJECTION DE PRODUIT DE CONTRASTE**

L'examen tomodensitométrique est peu utilisé pour faire le diagnostic de rupture du LCCr, car on ne peut observer que les images des conséquences de la rupture. De plus il nécessite une anesthésie générale, et son coût est important. Son intérêt dans les lésions méniscales est également nul. Son interprétation étant moins standardisée que l'examen radiographique, son utilisation est donc délicate. Elle présente cependant une image nettement plus précise que l'examen radiographique.

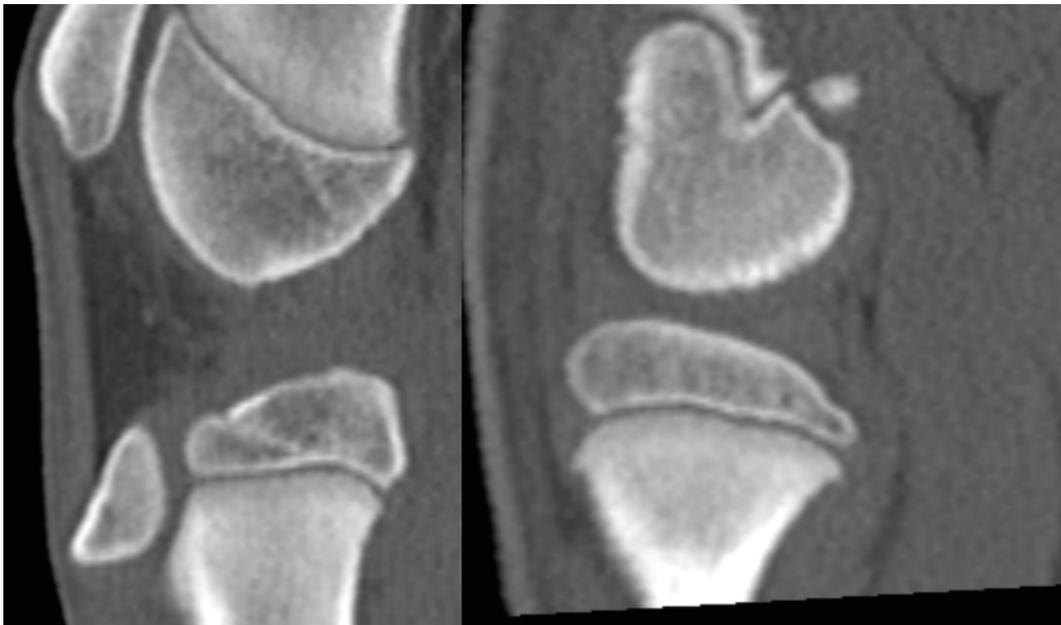
Les publications concernant le scanner du grasset du chien sont peu nombreuses, et incluent la plupart du temps une injection de produit de contraste. Néanmoins l'étude de quelques coupes anatomiques est intéressante car elle permet d'établir des repères par rapport à l'arthroscanner. On étudiera ainsi les coupes transverses, para-sagittales et frontales (Fig. 45, 46 et 47).



**Figure 45 : Coupe tomodensitométrique frontale d'un grasset sain en croissance**

Les ménisques ne sont pas visibles

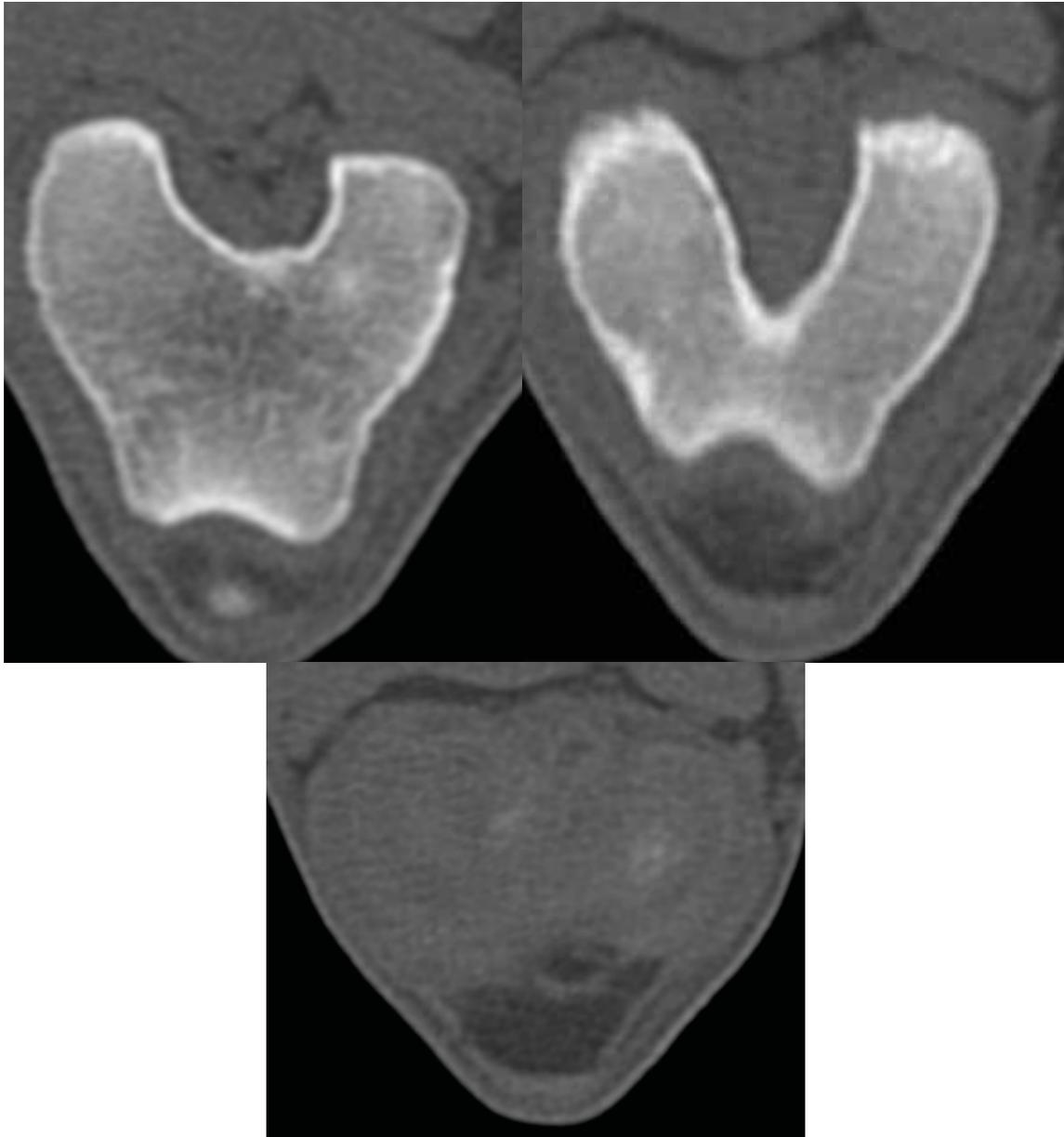
*(scanner F. Durieux)*



**Figure 46 : Coupes tomodensitométriques sagittales centrale (à gauche) et médiale (à droite) d'un grasset sain en croissance**

Les ménisques et les ligaments ne sont pas visibles.

*(scanner F. Durieux)*



**Figure 47 : Coupes tomodensitométriques transverses d'un grasset sain : au niveau de la fosse intercondylienne, au niveau des condyles fémoraux et au niveau des ménisques**

On ne distingue pas les structures fibro-cartilagineuses.

*(scanner F. Durieux)*

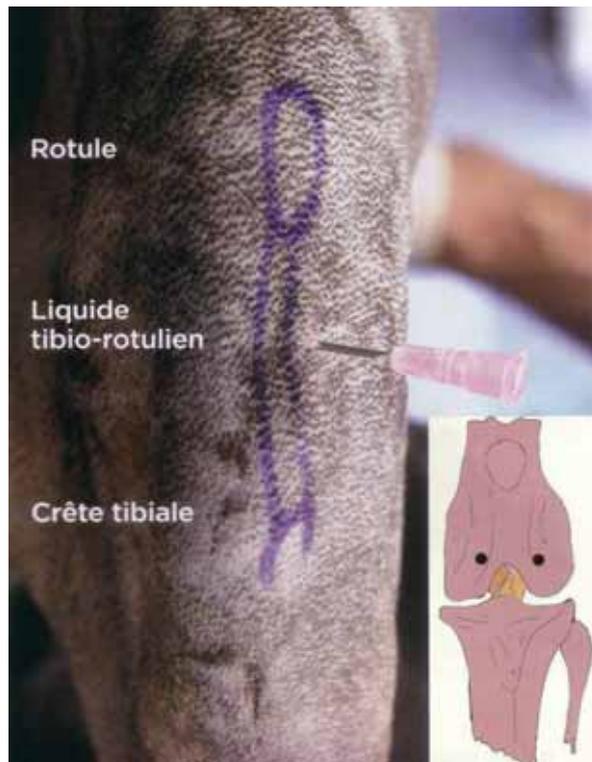
## **B. LES IMAGES TOMODENSITOMETRIQUES APRES** **INJECTION DE PRODUIT DE CONTRASTE**

### **I. MATERIEL ET METHODES**

Toutes les coupes ont été effectuées sur un cadavre, un border collie de huit mois euthanasié pour des raisons sans rapport avec notre étude, choisi pour sa corpulence afin d'obtenir des images de taille suffisante pour être facilement interprétables, pour sa race, sans prédisposition connue à des affections orthopédiques, ainsi que pour son jeune âge, limitant les risques de lésions articulaires.

#### **1. MATERIEL ET METHODES D'INJECTION DE L'ARTICULATION DU GENOU**

Le grasset gauche est tondu largement, le chien est en décubitus dorsal, les membres postérieurs en extension. Le site d'injection du liquide de contraste est situé latéralement ou médialement au ligament tibio-rotulien entre l'extrémité distale de la rotule et la crête tibiale, à travers le coussinet graisseux (Fig. 48). L'aiguille 22G est dirigée en direction de la fosse intercondylienne. Par précaution et pour vérifier le bon emplacement de l'aiguille, une aspiration préalable de liquide synovial est réalisée avant injection. 10 mL de produit de contraste iodé (Iohexol ND) non dilué sont injectés ainsi dans l'articulation. Après injection, des mouvements de flexion et d'extension du grasset injecté sont réalisés pendant une minute afin répartir le liquide de contraste dans toute l'articulation.



**Figure 48 : Site d'injection de l'articulation du grasset [9]**  
(D'après [15])

## **2. MATERIEL ET PROTOCOLE D'ACQUISITION TOMODENSITOMETRIQUE**

Le chien est placé en décubitus dorsal, les deux membres postérieurs parallèles et en extension, de façon à ce que les membres pelviens rentrent en premier dans le portique du scanner.

L'épaisseur des coupes choisie est d'un millimètre.

## **II. LES IMAGES PHYSIOLOGIQUES**

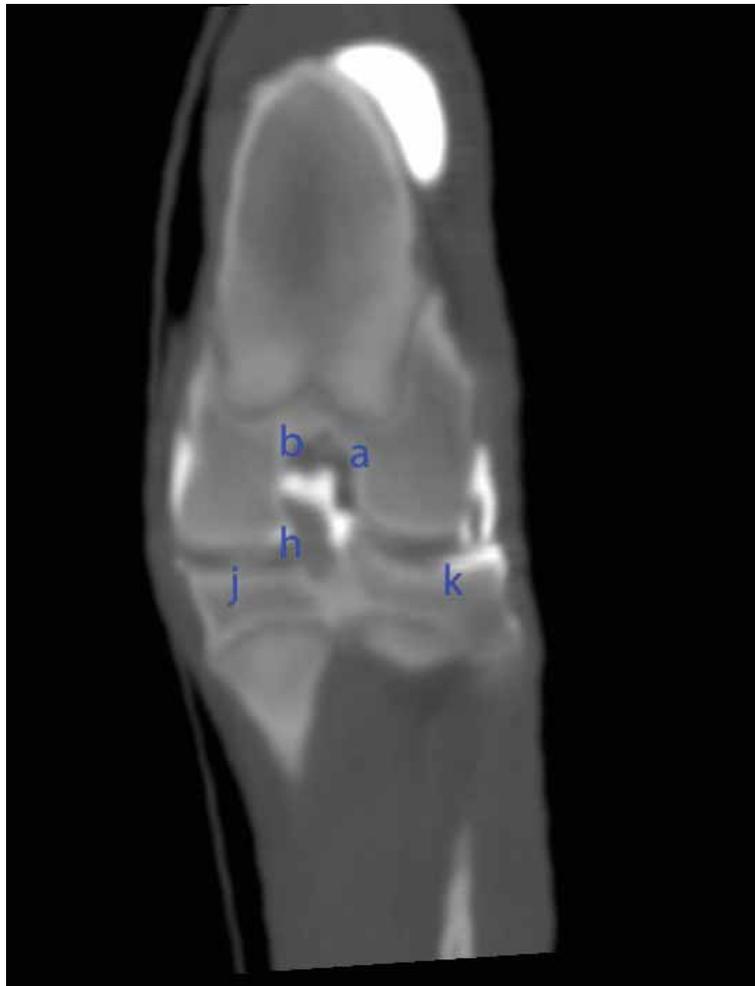
L'injection de produit de contraste permet de mettre en évidence les structures cartilagineuses et fibreuses par contraste. Ainsi le cartilage est visible, ainsi que les ligaments intra-articulaires et les ménisques [34,40].

Plusieurs coupes présentent un intérêt :

- Les coupes frontales, dites « coronales » en médecine humaine, permettent une bonne évaluation des ménisques ainsi que de la fosse intercondylienne (Fig. 49).

- Les coupes sagittales permettent de visualiser les ligaments croisés et de les évaluer (Fig. 50). Les ménisques sont également évaluables de cette manière, à partir de coupes parasagittales médiales ou latérales (Fig. 51). Le ligament ménisco-fémoral est aussi visible.

- Enfin, les coupes transverses doivent être observées de manière standardisée, afin d'y observer les ligaments méniscaux latéral crânial, médial crânial, latéral caudal et médial crânial, ainsi que les ligaments inter-méniscal et ménisco-fémoral (Fig. 52). Elles permettent donc une plus grande finesse dans l'évaluation des lésions méniscales [34,40].

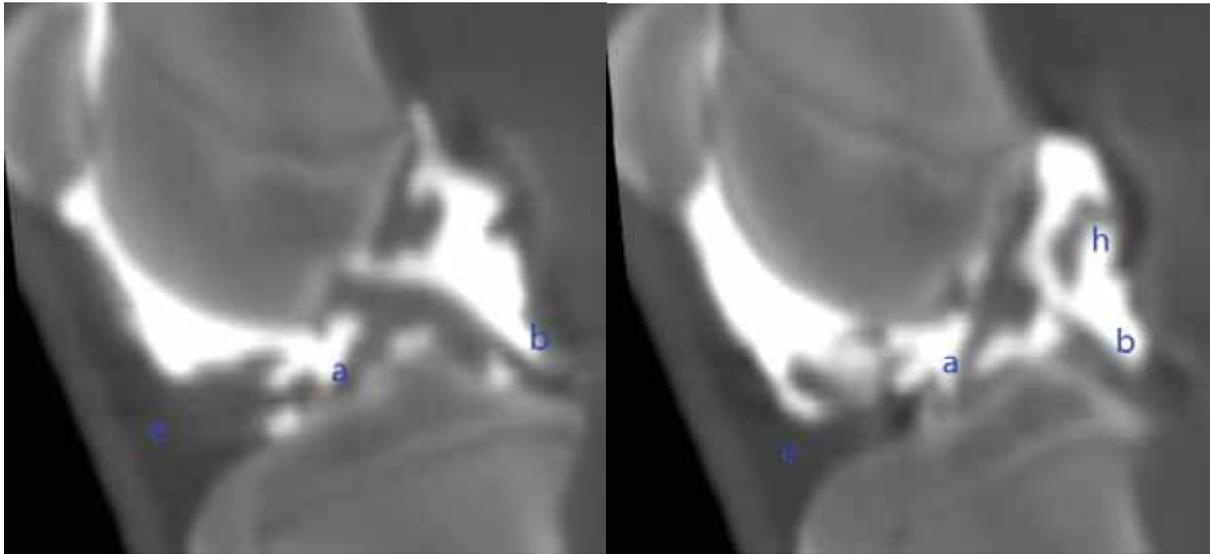


**Figure 49 : Coupe arthroscanner frontale caudale après injection de produit de contraste**

On observe les deux ménisques, ainsi que les ligaments croisés et le ligament ménisco-fémoral.

a = LCCr ; b = LCCd ; j = ménisque médial ; h = ligament ; k = ménisque latéral

(scanner F. Durieux)



**Figure 50 : Coupes sagittales après injection de produit de contraste : au niveau du LCCd ( à gauche) et au niveau du LCCr ( à droite)**

a = LCCr ; b = LCCd ; e = coussinet adipeux ; h = ligament ménisco-fémoral

(scanner F. Durieux)

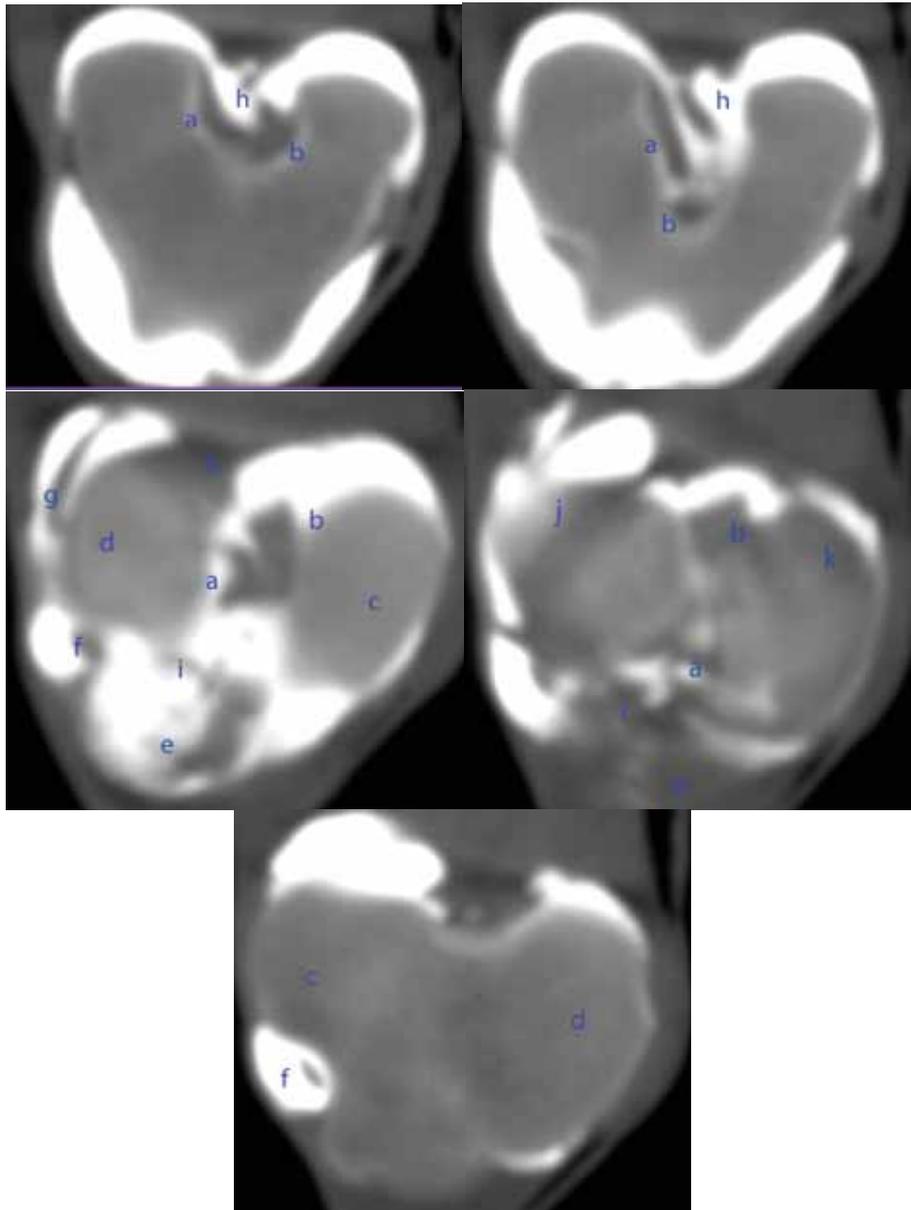


**Figure 51 : Coupe parasagittale médiale après injection de produit de contraste**

On observe les cornes postérieure et antérieure du ménisque médial.

t = ménisque médial

(scanner F. Durieux)



**Figure 52 : Coupes transverses après injection de produit de contraste des condyles tibiaux à la fosse intercondylienne**

a = LCCr ; b = LCCd ; c = condyle tibial latéral ; d = condyle tibial médial ; e = coussinet adipeux ; f = long extenseur des doigts ; g = tendon du muscle poplité ; h = ligament ménisco fémoral ; i = ligament inter méniscal ; j = ménisque médial ; k = ménisque latéral.

*(scanner F. Durieux)*

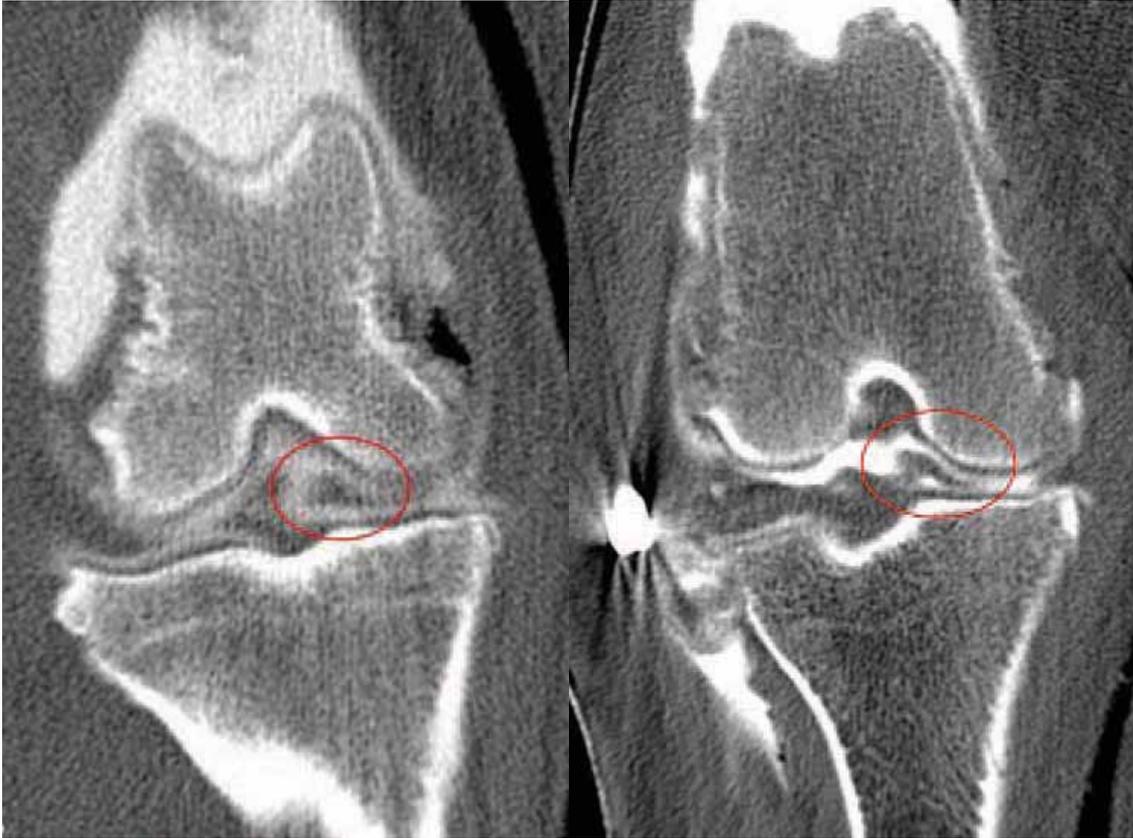
### III. LES IMAGES PATHOLOGIQUES

Les ruptures complètes du LCCr sont nettement visibles à l'arthroscanner, puisque le LCCr est toujours observable sur les images physiologiques. Une solution de continuité est alors recherchée. Les ruptures partielles sont difficilement observables, des signes indirects doivent alors être recherchés.

Les lésions méniscales sont observables :

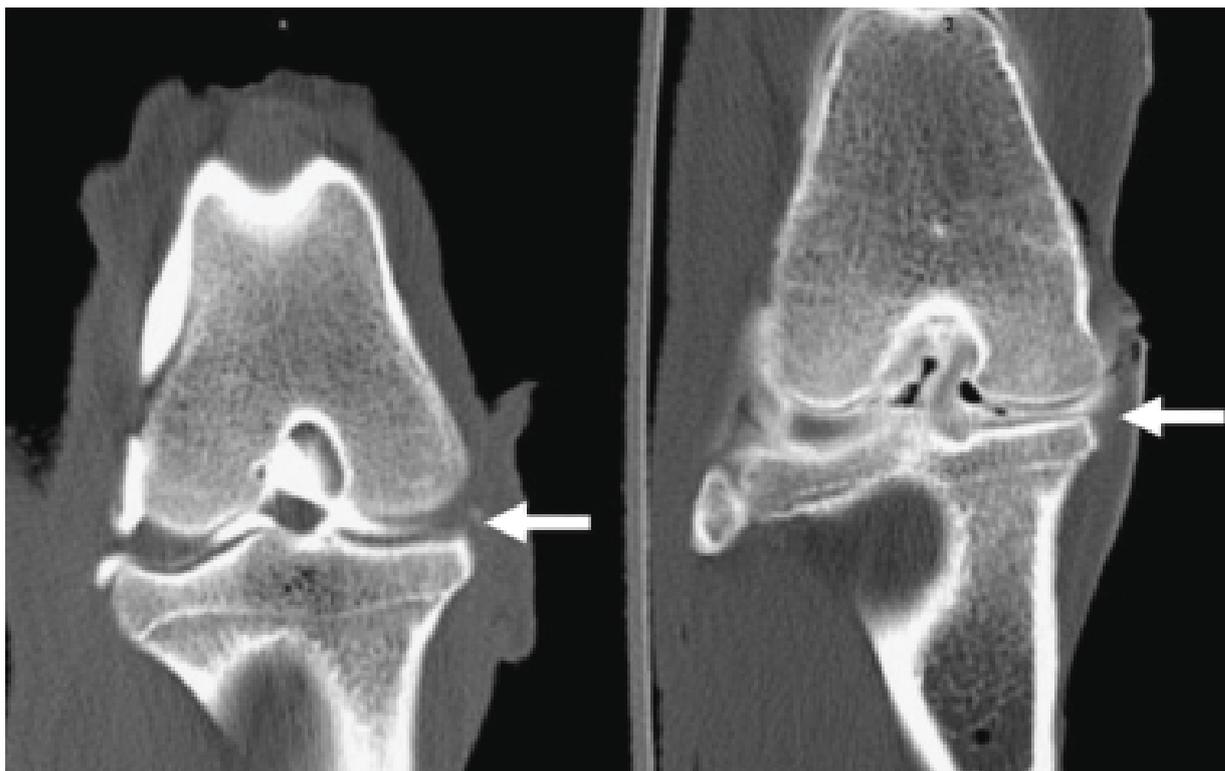
- Les fissures longitudinales sont observables sur les coupes coronales et parasagittales, visibles comme des fines lignes radio-opaques au sein du ménisque (Fig. 53).
- Les lésions de retournement de la corne postérieure sont assimilables à un renflement radio-opaque médialement à l'éminence intercondylienne (Fig. 53).
- Les lésions d'écrasement ou les déchirures très sévères se présentent comme une soustraction de l'image méniscale classique : un pincement est alors visible, et seul persiste le liquide de contraste entre le tibia et le fémur (Fig. 54).

On peut également observer des ruptures des ligaments méniscaux, des lésions de l'os sous-chondral, ainsi que des remaniements liés à la dégénérescence articulaire.



**Figure 53 : Coupe arthroscanner frontale d'un grasset présentant une fissure longitudinale du ménisque et une corne postérieure retournée crânialement**

L'image hypodense médialement à l'éminence intercondylienne (cercle rouge) représente le retournement de la corne postérieure. (*D'après [41]*)



**Figure 54 : Coupe arthroscanner frontale d'un grasset avant (à gauche) et après (à droite) méniscectomie médiale**

On observe la disparition de l'image triangulaire hypodense classique du ménisque, seul subsiste le liquide de contraste entre le tibia et le fémur en région médiale. Les écrasements du ménisque médial présentent les mêmes images de pincement. (D'après [40])

#### **IV. INTERÊTS ET LIMITES DE L'ARTHROSCANNER**

L'arthroscanner est peu encore peu décrit en médecine vétérinaire, et il existe peu de données sur la sensibilité et la spécificité de cet examen concernant le diagnostic de rupture de LCCr et de lésion méniscale.

Néanmoins, en médecine humaine, une sensibilité et une spécificité proche de 100% est décrite pour la rupture du LCCr et une sensibilité et une spécificité de plus de 90% sont décrites pour la détection des lésions méniscales. De tels résultats sont probablement transposables en médecine vétérinaire, en tenant compte de la taille des articulations.

Grâce aux logiciels d'exploitation et de travail des images acquises, une arthroscopie virtuelle en 3D est maintenant possible, avec un caractère moins invasif, réalisable à l'infini. Etant donné le caractère invasif d'une arthroscopie, cette voie est à explorer.

En médecine humaine, la méthode de référence est l'utilisation de l'imagerie à résonance magnétique avec de très haute sensibilité (95%) et spécificité (91%) [40]. Cependant, lorsque les patients ont des lésions du cartilage hyalin ou uniquement méniscales, l'arthroscanner est préféré. En médecine vétérinaire, le scanner avec produit de contraste est une alternative plus accessible, avec une spécificité et une sensibilité comparables. En outre, le temps d'acquisition est nettement plus court, et la technologie évoluant, l'anesthésie générale ne devrait plus être nécessaire d'ici peu de temps. Il s'agit donc de l'outil diagnostique le plus fiable, associé à une mise en œuvre assez rapide (le temps d'examen peut être réduit à 20 minutes). Il permet en outre une confirmation du diagnostic de rupture du LCCr fiable.

De plus, les scanners sont de plus en plus disponibles en France, la tomodensitométrie se démocratisant peu à peu.

Son coût demeure un frein à un développement plus important, et d'autres études sont nécessaires pour évaluer la sensibilité et la spécificité de cet examen sur des chiens de différentes tailles.

Une autre limite de cette étude, ainsi que de celle de V. Samii de 2004 ou de MS Tivers de 2008 est qu'elles sont réalisées sur cadavre, sans lésions ou avec des lésions simulées. Or, les pathologies transforment les articulations et provoquent des effusions articulaires, de la fibrose, une ostéophytose qui peuvent interférer avec la qualité des images produites. La présence de liquide d'effusion peut en théorie aider à la diffusion du liquide de contraste contrairement à de la fibrine ou aux adhérences [40].

Une étude additionnelle peut se révéler intéressante : il s'agit des images obtenues avec des éléments générateurs d'artéfacts de « beam-hardening » ou « image en étoile », comme une plaque de TPLO ou du fil de suture tibio-fabellaire en nylon . En ce qui concerne les artéfacts créés par le fil de nylon, ils sont minimes et ne perturbent que très peu la lecture des images (Fig. 55). Par contre, « l'image en étoile » créée par la plaque de TPLO empêche la visualisation du ménisque médial, le ménisque latéral étant toujours évaluable [40] (Fig. 56).



**Figure 55 : Coupe arthroscanner frontale d'un grasset avec présence d'une suture tibio-fabellaire**  
On note ici que les artefacts créés par le fil de nylon sont minimales et ne perturbent que très peu la lecture des images. (D'après [40])



**Figure 56 : Coupe arthroscanner frontale d'un grasset avec présence d'une plaque de TPLO de 3.5 mm**

« L'image en étoile » créée par la plaque de TPLO empêche la visualisation du ménisque médial.  
(D'après [40])

## **CONCLUSION**

La rupture du ligament croisé crânial est l'affection musculo-squelettique la plus fréquente chez le chien, avec dans 49 à 70 % des cas des lésions méniscales associées qu'il est nécessaire de traiter sous peine de persistance de douleurs et de boiterie.

Actuellement, le diagnostic de cette affection est avant tout clinique, avec l'aide de différents examens complémentaires. Néanmoins, nous avons vu que même si le signe du tiroir est très spécifique, il ne montre qu'une sensibilité médiocre sur animal vigile, nécessitant alors une tranquillisation, voire une anesthésie générale.

En ce qui concerne les examens complémentaires, l'arthroscopie est une technique invasive. Nous avons vu que différentes techniques d'imagerie sont réalisables : l'examen radiographique est très sensible et très spécifique lors de rupture du LCCr, même s'il ne donne que des signes indirects de rupture du ligament. Cependant, cet examen ne permet pas d'observer les ménisques. Les lésions méniscales doivent donc être explorées par d'autres moyens.

En pratique clinique, les lésions méniscales sont mises en évidence et traitées en même temps, durant l'arthrotomie ou l'arthroscopie, deux interventions très invasives. Or, la nécessité de l'arthrotomie n'a en effet été démontrée que dans le cas de lésions méniscales. Une détection sensible et non invasive des lésions méniscales permettrait éventuellement d'éviter cet acte réputé arthrogène. Cela pourrait permettre d'abaisser le taux de morbidité des techniques de stabilisation du grasset par ostéotomie ou avancement de la crête tibiale. En outre, cela réduirait le temps opératoire et anesthésique et par conséquent le risque septique.

L'échographie du grasset, fiable, rapide, non invasive et pouvant se pratiquer sur animal vigile présente un intérêt dans la détection des lésions méniscales. Néanmoins, la fiabilité de l'échographie est très opérateur-dépendante. Elle ne constitue donc pas actuellement l'examen de choix pour le diagnostic de rupture du LCCr. Mais sans doute qu'avec l'apparition des sondes microconvexes et l'amélioration constante de la qualité d'image, la sensibilité de cet examen dans la détection des ruptures du LCCr s'améliorera.

L'IRM présente plusieurs intérêts lors de rupture du LCCr, notamment la visualisation du LCCr avec une éventuelle rupture de celui-ci avec une sensibilité de 100% et une spécificité de 80%. Cependant, la rupture partielle est difficile à diagnostiquer. Elle permet aussi de déceler des lésions méniscales avec une sensibilité de plus de 90% et une spécificité de plus de 90% [27], ainsi qu'une meilleure appréciation des lésions des tissus

mous péri-articulaires. En revanche son intérêt est pour le moment limité, compte tenu des contraintes dues à son utilisation ( temps d'acquisitions trop long, manque de disponibilité et coût).

L'examen tomodensitométrique est peu utilisé pour faire le diagnostic de rupture du LCCr, car on ne peut observer que les images des conséquences de la rupture, tout comme en radiographie. De plus il nécessite une anesthésie générale, et son coût est important. Son intérêt dans les lésions méniscales est également nul. De plus, son interprétation est moins standardisée que pour l'examen radiographique classique, son utilisation est donc difficile. Elle présente cependant une image nettement plus précise que l'examen radiographique

Le scanner avec produit de contraste est une alternative plus accessible et satisfaisante, avec une spécificité et une sensibilité comparables à l'IRM. Le temps d'acquisition est nettement plus court, et la technologie évoluant, l'anesthésie générale ne devrait plus être nécessaire à terme. Il s'agit donc de l'outil diagnostique le plus fiable, associé à une mise en œuvre assez rapide (le temps d'examen peut être réduit à 20 minutes). Il permet, comme nous l'avons démontré par notre étude, une visualisation des ligaments et donc confirmation du diagnostic de rupture du LCCr fiable associées à une évaluation des ménisques et de leurs lésions. De plus, les scanners sont de plus en plus disponibles en France, la tomodensitométrie se démocratisant peu à peu. Il est donc fortement probable que dans un avenir proche, cet examen se répande pour le diagnostic et la décision thérapeutique des ruptures de LCCr. En outre, grâce aux logiciels d'exploitation et de travail des images acquises, une arthroscopie virtuelle en 3D est possible, avec un caractère nettement moins invasif, réalisable à l'infini. Etant donné le caractère invasif d'une arthroscopie, cette voie est à explorer.

L'intérêt du scanner des articulations avec injection de produit de contraste iodé ne se limite évidemment pas à rupture du ligament croisé antérieur et à l'articulation du grasset. En effet, l'évolution de la médecine vétérinaire suivant celle de la médecine humaine, on peut imaginer de nombreuses applications à cet examen complémentaire de choix :

- Pour l'articulation du grasset, la présence de liquide de contraste dans les lésions d'ostéochondrite disséquante du condyle fémoral permettrait l'évaluation complète de celles-ci, à savoir la taille précise, la localisation et la stabilité des souris articulaires.
- Pour l'articulation de la hanche, l'arthroscanner donnerait lieu à l'évaluation plus précise des ostéophytes, de la surface de contact articulaire c'est-à-dire la congruence articulaire [13].

- Quant à l'articulation du coude, l'intérêt majeur étant donné la fréquence de l'affection serait sans doute la visualisation plus précise de la fragmentation du processus coronoïde médial. La surface de contact articulaire du coude doit pouvoir également être mesurée, comme pour l'articulation de la hanche, pour évaluer l'incongruence articulaire. La stabilité du processus anconé devrait également pouvoir être évaluée, ce qui permettrait d'affiner le choix thérapeutique. Enfin, le liquide de contraste s'insinuant dans les fissures, les fissures intercondyliennes humérales devraient alors être visualisées.
- En ce qui concerne l'articulation de l'épaule, les intérêts sont variés également : l'ostéochondrite disséquante présente un intérêt, tout comme la non-union du centre d'ossification caudal de la glène. La réalisation d'un arthroscanner dans le cadre de la tendinite du biceps permettrait peut être la visualisation de modifications, d'anomalies évitant alors le recours à l'arthroscopie. L'instabilité de l'articulation de l'épaule, due à une anomalie du ligament médial, classiquement explorée par arthroscopie, mériterait également d'être étudiée par arthroscanner.

De nombreuses affections sus-citées sont classiquement évaluées par arthroscopie, technique soumise à de nombreux inconvénients dont nous avons déjà parlés. Certains logiciels d'exploitation des images tomodynamométriques (Osirix ND) permettent désormais la réalisation d'arthroscopie virtuelles, répétables à l'infini dans le temps une fois l'acquisition des images faite. De nombreuses études complémentaires sont évidemment nécessaires avant la mise en place en routine de ces examens et la mise en œuvre de toutes ces applications nécessitent, comme pour l'articulation du grasset, un atlas de référence de coupes tomodynamométriques avec injection de produit de contraste pour chacune des articulations. Cependant, avec le développement exponentiel du nombre de scanners vétérinaires, l'arthroscanner pourrait devenir un examen d'intérêt pour de nombreuses affections orthopédiques dans un avenir assez proche.

Direction de l'Enseignement et de la Vie Universitaire

**AGREMENT ADMINISTRATIF**

Je soussigné, A. MILON, Directeur de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse, certifie que  
**Mlle TRAN-DAC Emilie Dieu-Hien, Eve**  
a été admis(e) sur concours en : 2004  
a obtenu son certificat de fin de scolarité le : 11 juin 2009  
n'a plus aucun stage, ni enseignement optionnel à valider.

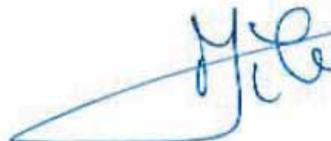
**AGREMENT SCIENTIFIQUE**

Je soussigné, MOGICATO Giovanni, Maître de Conférences de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse,  
autorise la soutenance de la thèse de :  
**Mlle TRAN-DAC Emilie Dieu-Hien, Eve**  
intitulée :  
« ATLAS TOMODENSITOMETRIQUE AVEC INJECTION DE PRODUIT DE CONTRASTE DU GRASSET  
DU CHIEN *Application à la rupture du ligament croisé crânial et comparaison aux autres techniques  
d'imagerie* »

**Le Professeur**  
de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse  
Docteur Giovanni MOGICATO



**Vu :**  
**Le Directeur**  
de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse  
Professeur Alain MILON



**Vu :**  
**Le Président de la thèse :**  
Professeur Isabelle BERRY



**Faculté de Médecine Rangueil**  
Biophysique Médicale - CHU Rangueil  
1, avenue Jean Poulhès - TSA 50032  
31059 TOULOUSE Cedex

**Vu le : 29/09/2010**  
**Le Président**  
de l'Université Paul Sabatier  
Professeur Gilles FOURTANIER



## BIBLIOGRAPHIE

1. Akeson W. *The response of ligaments to stress modulation*: Ed Raven Press, 1990.
2. Arnault F, Cauvin E, Viguier E, et al. Diagnostic value of ultrasonography to assess stifle lesions in dogs after cranial cruciate ligament rupture: 13 cases. *Vet Comp Orthop Traumatol* 2009;22:479-485.
3. Baird DK, Hathcock JT, Rumph PF, et al. Low-field magnetic resonance imaging of the canine stifle joint: normal anatomy. *Vet Radiol Ultrasound* 1998;39:87-97.
4. Banfield CM, Morrison WB. Magnetic resonance arthrography of the canine stifle joint: technique and applications in eleven military dogs. *Vet Radiol Ultrasound* 2000;41:200-213.
5. Barone R. *Anatomie comparée des mammifères domestiques*. Paris: Ed Vigot, 1980.
6. Baroni E, Matthias RR, Marcellin-Little DJ, et al. Comparison of radiographic assessments of the tibial plateau slope in dogs. *Am J Vet Res* 2003;64:586-589.
7. Blond L, Thrall DE, Roe SC, et al. Diagnostic accuracy of magnetic resonance imaging for meniscal tears in dogs affected with naturally occurring cranial cruciate ligament rupture. *Vet Radiol Ultrasound* 2008;49:425-431.
8. Carobbi B, Ness MG. Preliminary study evaluating tests used to diagnose canine cranial cruciate ligament failure. *J Small Anim Pract* 2009;50:224-226.
9. Chancrin JL. Comment réaliser une arthrocentèse? . *Pratiquevet* 2008;48:34-37.
10. CHU, Poitiers. L'échelle de Hounsfield: <http://www.chu-poitiers.fr/1ad48c35-d641-447d-b680-f5440e454252.aspx>, Pages consultées en mars 2009.
11. Conzemius MG, Hill CM, Sammarco JL, et al. Correlation between subjective and objective measures used to determine severity of postoperative pain in dogs. *J Am Vet Med Assoc* 1997;210:1619-1622.

12. D'Anjou MA, Moreau M, Troncy E, et al. Osteophytosis, subchondral bone sclerosis, joint effusion and soft tissue thickening in canine experimental stifle osteoarthritis: comparison between 1.5 T magnetic resonance imaging and computed radiography. *Vet Surg* 2008;37:166-177.
13. Dejardin LM, Perry RL, Arnoczky SP. The effect of triple pelvic osteotomy on the articular contact area of the hip joint in dysplastic dogs : an in vitro experimental study. *vet Surg* 1998;27:194-202.
14. Delisle F. La tomодensitométrie en médecine vétérinaire. *Le point vétérinaire* 1993;25:552-559.
15. Dembourg T, Chancrin J-L. Comment réaliser une arthrocenthèse? *Pratiquevet* 2008;48.
16. Doyon D, Laval-Jeantet M, Halimi P. *Abrégés de tomодensitométrie*. Masson ed, 1988.
17. Drapé J, Ghitalla S, Autefage A. Lésions méniscales et rupture du ligament croisé antérieur : étude rétrospective de 400 cas. *Point Vét* 1990;22:39.
18. Drapé J, Ghitalla S, Autefage A. Rupture du ligament croisé antérieur (L.C.A.) chez le chien : pathologie traumatique ou dégénérative? *Point Vét* 1990;22.
19. Encyclopédie, Wikipédia. Tomодensitométrie: Adresse URL : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Tomodensitométrie>, Pages consultées en juillet 2009.
20. Engelke A, Meyer-Lindenberg A, Nolte I. [Ultrasonography of the inner stifle joint in dogs with rupture of the cruciate ligaments]. *Dtsch Tierarztl Wochenschr* 1997;104:114-117.
21. Fettig AA, Rand WM, Sato AF, et al. Observer variability of tibial plateau slope measurement in 40 dogs with cranial cruciate ligament-deficient stifle joints. *Vet Surg* 2003;32:471-478.
22. Flo G. Meniscal injuries. *Vet Clin North Am Small Anim Pract* 1993;23:831-843.

23. Gnudi G, Bertoni G. Echographic examination of the stifle joint affected by cranial cruciate ligament rupture in the dog. *Vet Radiol Ultrasound* 2001;42:266-270.
24. Hathcock JT, Stickle RL. Principles and concepts of computed tomography. *Vet Clin North Am Small Anim Pract* 1993;23:399-415.
25. Hurley CR, Hammer DL, Shott S. Progression of radiographic evidence of osteoarthritis following tibial plateau leveling osteotomy in dogs with cranial cruciate ligament rupture: 295 cases (2001-2005). *J Am Vet Med Assoc* 2007;230:1674-1679.
26. Inauen R, Koch D, Bass M, et al. Tibial tuberosity conformation as a risk factor for cranial cruciate ligament rupture in the dog. *Vet Comp Orthop Traumatol* 2009;22:16-20.
27. J C. IRM de la rupture du ligament croisé antérieur et apport de cette technique dans le diagnostic des lésions méniscales chez le chien.: ÉCOLE NATIONALE VÉTÉRINAIRE D'ALFORT, 2006;96.
28. Kramer M, Stengel H, Gerwing M, et al. Sonography of the canine stifle. *Vet Radiol Ultrasound* 1999;40:282-293.
29. Lisbona A. Le scanner, principes, technologies, applications: Adresse URL : <http://e2phy.in2p3.fr/2002/presentations/lisbona.pdf>, Pages consultées en juillet 2010.
30. Martig S, Konar M, Schmokel HG, et al. Low-field Mri and arthroscopy of meniscal lesions in ten dogs with experimentally induced cranial cruciate ligament insufficiency. *Vet Radiol Ultrasound* 2006;47:515-522.
31. Metelman L. An evaluation of three different cranial cruciate ligament surgical stabilization procedures as they relate to postoperative meniscal injuries\_a retrospective study of 665 stifles. *Vet Comp Orthop Traumatol* 1995;8:118-123.
32. Nahum H. *Traité d'imagerie médicale*. Médecine-sciences Flammarion ed, 2004.
33. Piermattei DL, Flo GL, DeCamp CE. *Handbook of small animal orthopedics and fracture repair*. Fourth ed. St Louis: saunder, 2006.

34. Samii VF, Dyce J. Computed tomographic arthrography of the normal canine stifle. *Vet Radiol Ultrasound* 2004;45:402-406.
35. Samueli J-J. La découverte des rayons X par Röntgen. *Bibnum*: Adresse URL : <http://www.bibnum.education.fr/physique/la-decouverte-des-rayons-x-par-roentgen>  
Pages consultées en février 2009.
36. Sauret J. Atlas d'anatomie du chien en coupes sériées corrélées aux coupes TDM et IRM, 1990.
37. Slocum B, Devine T. Cranial tibial thrust: a primary force in the canine stifle. *J Am Vet Med Assoc* 1983;183:456-459.
38. Slocum B, Slocum TD. Tibial plateau leveling osteotomy for repair of cranial cruciate ligament rupture in the canine. *Vet Clin North Am Small Anim Pract* 1993;23:777-795.
39. SOCIMED. La scanographie (Tomodensitométrie), 2006.
40. Tivers MS, Mahoney P, Corr SA. Canine stifle positive contrast computed tomography arthrography for assessment of caudal horn meniscal injury: a cadaver study. *Vet Surg* 2008;37:269-277.
41. Tivers MS, Mahoney PN, Baines EA, et al. Diagnostic accuracy of positive contrast computed tomography arthrography for the detection of injuries to the medial meniscus in dogs with naturally occurring cranial cruciate ligament insufficiency. *J Small Anim Pract* 2009;50:324-332.
42. Vasseur P. Stifle Joint In: Slatter D, ed. *Textbook of Small Animal Surgery*. Philadelphia: Saunders, 2003;2090-2133.
43. Whitehair JG, Vasseur PB, Willits NH. Epidemiology of cranial cruciate ligament rupture in dogs. *J Am Vet Med Assoc* 1993;203:1016-1019.
44. Wilke VL, Conzemius MG, Besancon MF, et al. Comparison of tibial plateau angle between clinically normal Greyhounds and Labrador Retrievers with and without rupture of the cranial cruciate ligament. *J Am Vet Med Assoc* 2002;221:1426-1429.