

Imagerie par résonance magnétique des ruptures du ligament croisé antérieur : apport de la séquence axiale oblique

Stéphane Long

▶ **To cite this version:**

Stéphane Long. Imagerie par résonance magnétique des ruptures du ligament croisé antérieur : apport de la séquence axiale oblique. Médecine humaine et pathologie. 2012. dumas-00745739

HAL Id: dumas-00745739

https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00745739

Submitted on 26 Oct 2012

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

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

FACULTE MIXTE DE MEDECINE ET DE PHARMACIE DE ROUEN

Année 2012 N°

THESE POUR LE DOCTORAT EN MEDECINE

(Diplôme d'état)

PAR

LONG STEPHANE

Né le 12 février 1982 à Brest

Présentée et soutenue publiquement le 5 octobre 2012

IMAGERIE PAR RESONNANCE MAGNETIQUE DES RUPTURES DU LIGAMENT CROISE ANTERIEUR : APPORT DE LA SEQUENCE AXIALE OBLIQUE

Président du jury : M. le Professeur J-N.DACHER
Directeur de thèse : M. le Docteur P.MICHELIN
Membres du jury : M. le Professeur E.GERARDIN
M. le Professeur F.DUJARDIN
M. le Docteur J-M.ADAM

Par délibération en date du 3 mars 1967, la faculté a arrêté que les opinions émises dans les dissertations qui lui seront présentées doivent être considérées comme propres à leurs auteurs et qu'elle n'entend leur donner aucune approbation ni improbation.

Remerciements

Au Professeur Jean-Nicolas Dacher,
Vous me faites l'honneur de présider mon jury de thèse.
Vous m'avez accueilli fort chaleureusement dans votre service, où nos échanges ont toujours été très agréables.
Veuillez recevoir ici l'expression de ma grande considération et de ma gratitude.

Au Professeur Franck Dujardin,
L'accueil exceptionnel dont j'ai bénéficié dans votre service m'a particulièrement touché. J'apprécie votre grande compétence et votre personnalité. Recevez ici le témoignage de tout mon respect et de ma gratitude.

Au Professeur Emmanuel Gérardin,
Tu m'as soutenu et fais confiance pendant tout mon internat. Ton enseignement et ta disponibilité ont été précieux. Trouve ici le témoignage de ma respectueuse gratitude.

Au Docteur Paul Michelin,
Tu as su me conseiller, m'encadrer et m'encourager dans ce projet. Travailler et se former à tes côtés est une chance. Reçois ici toute ma gratitude.

Au Docteur Jacques-Marie Adam,
Je te remercie de juger ma thèse.
Reçois ici toute mon affection et tout mon respect.

Au Docteur Jean Pierre Louvel,
Tu m'as parfaitement accueilli dans ton service, avec sérieux et enthousiasme. Je te remercie pour tes conseils et ton extrême amabilité tout au long de mes années d'internat.

Au Docteur Alain Janvresse,
Recevez ici le témoignage de mon plus grand respect et de ma plus grande admiration.

Au Docteur Jacqueline Henry,
Travailler avec toi fut un réel plaisir.

Au Docteur Céline Savoye-Collet,
Trouve ici l'expression de ma considération et de toute ma sympathie.

Au Docteur Jean Pierre Lestrat,
Reçois ici l'expression de ma gratitude pour tes innombrables avis éclairés et le témoignage de mon admiration.

Au Docteur Edith Koening,
Ta patience, ta compréhension et tes compétences sont inestimables. J'ai eu grand plaisir à travailler avec toi.

Au Docteur Jacques Simonet,

Au Docteur Jean Baptiste Roset,

Au Docteur Eric Clavier,

Au Docteur Anne Genevois,

Au Docteur Hend Belhiba,

Au Docteur Pierre-Hugues Vivier,

Au Docteur Isabelle Bardoux,

Au Docteur Charles Randriamalala,

A mes maîtres de stages, les Docteurs Didier Weinstein, Yvan Vaschalde, Brigitte Diologent, Françoise Callonec,
Vous m'avez encadré au cours de ma formation médicale avec beaucoup de sérieux et de sympathie à mon égard, et je vous en suis très reconnaissant.

Au Professeur Duparc et aux équipes du service d'orthopédie.
A tous les seniors, assistants et internes d'orthopédie,
Un grand merci pour votre gentillesse et votre accueil. Travailler en collaboration avec vous et s'intégrer à votre équipe fût un vrai plaisir.

Aux équipes de manipulateurs, de secrétariat et à l'ensemble du personnel du service de radiologie centrale,
Pour votre gentillesse et votre professionnalisme. J'ai partagé d'excellents moments parmi vous. Je vous en remercie.

Aux manipulateurs d'IRM,
Un grand merci pour leur participation active et indispensable à cette étude.

A Michael et Sébastien,
Merci pour votre aide précieuse et votre disponibilité.

A Graciette,
Merci pour tout.

Au Docteur Eléonore Tollard,
J'admire ta compétence, ton entrain quasi inépuisable, ta constance. Je suis conscient d'avoir eu la chance de travailler à tes côtés.

Au Docteur Guillaume Pérot,
Tu m'as donné une somme de bons conseils pendant toutes ces années. Ta sympathie m'a beaucoup touché. Reçois ici mes remerciements les plus sincères.

Au Docteur Jérôme Caudron,
Ta grande compétence, ton calme, tes qualités pédagogiques sont admirables. Reçois ici mes remerciements et le témoignage de toute ma sympathie.

Au Docteur Maher Chaker,
Reçois ici le témoignage de mon amitié et de tout mon respect.

A Cathia, Rodolphe, Olivier, Nathalie, Asrare, Cécile, Claire, Sarah,
Merveilleux souvenirs. Je vous souhaite le meilleur à venir.

A Alexandre,
どうもありがとうございました

A Antoine et Benjamin,
Mémorables soirées de DU, même si vous êtes mauvais joueurs et souvent en dedans…

A Valentin,
Un des meilleurs souvenirs de mon internat sont les quelques mois de squat geek chez toi. Je ne l'oublierai pas. A très très bientôt…

A mes co-internes de radiopédiatrie, CDC et CDV,
« No stress. »

A mes co-internes de Bois Guillaume, Anne Sophie, Cyrielle et le Colibri.

A mes co-internes de Neuroradiologie, Valérie et Amel,
Merci de m'avoir supporté. N'oubliez pas la base de données…!

A Adrien et Greg,
« Pathé et Gaumont. » Merci pour tout !

A tous les autres internes de radio jeunes et moins jeunes : Nicolas, Nassar, Claire, Malek, Asmaa, Raphaël, Sophie, Adnan, Florence, Manuel, Lauren, Sonia, Samuel, Laurence, Dorothée, Grégoire, Kevin, ...
Recevez ici mes vœux de réussite.

Au vieux amis de LLG : Jonathan, David, Manu, Vincent, Thomas, Nicolas…

Aux amis du Havre, Vincent LG, Grégoire, Sylvie, Vincent J, Nico & Ségo, Hadj, Cathia, Beber, Fabien, Guillaume…

Aux Bretons : Aurélie, Gaëlle et Gwendal, Lauriane.

Aux Caennais : Roxane, Momo, Victor, Julien, Xavier, Loïc.

Au Docteur Seng et sa famille,
Merci de me faire l'honneur de votre présence.

Remerciements au laboratoire Bracco pour l'impression de la thèse.

A mes parents,
Vous m'avez apporté un soutien indéfectible tout au long de ces années, j'espère que vous pourrez être fiers de moi.
Je vous aime.

A mon frère David,
Je t'aime.

A ma sœur Nathalie, à Olivier, à mes nièces Zoé et Philippine,
Je vous aime.

A Hélène,
Je t'aime.

Sommaire

Abréviations **1**

1. Introduction **2**
1.1 Anatomie du ligament croisé antérieur 2
1.2 Biomécanique du ligament croisé antérieur 3
1.3 Ruptures du LCA 6
1.3.1 Généralités *6*
1.3.2 Ruptures partielles du LCA *7*
1.3.3 Arthroscopie du LCA *9*
1.4. Moyens d'exploration radiologiques du LCA 9
1.4.1 Radiographies standard *9*
1.4.2 Radiographies dynamiques *11*
1.4.3 Arthro-TDM *12*
1.4.4 Echographie *12*

2. Imagerie par résonnance magnétique des ruptures du LCA **13**
2.1 Généralités 13
2.2 Technologie 13
2.2.1 Champ magnétique *13*
2.2.2 Installation du patient *14*
2.2.3 Séquences IRM *15*
2.3 Aspects remnographiques du LCA normal 17
2.3.1 Anatomie du LCA en coupes orthogonales *17*
2.3.2 Anatomie du LCA en coupes axiales obliques *19*
2.4 Sémiologie IRM des ruptures du LCA 21
2.4.1 Signes directs *21*
2.4.2 Signes indirects *24*
2.5 Pièges et difficultés d'interprétation 27
2.5.1 Ruptures partielles *27*
2.5.2 Effet de volume partiel *28*
2.5.3 Autres causes de faux négatifs *29*
2.5.4 Autres causes de faux positifs *29*

3. Etude **31**
3.1 Introduction 31
3.2 Matériel et méthode 32
3.2.1 Patients *32*
3.2.2 Protocole d'acquisition *33*
3.3.3 Interprétation des images IRM *36*
3.3.4 Analyse statistique *37*
3.2 Résultats 38
3.2.1 Evaluation du statut du LCA *38*
3.2.2 Evaluation de la visibilité de la structure bifasciculaire *42*
3.3.3 Etude du niveau de confiance diagnostique *44*
3.3.4 Relation entre visibilité de la structure bifasciculaire et niveau de confiance diagnostique *46*
3.4 Discussion 50
3.4.1 Analyse des résultats sur l'évaluation du LCA *50*
3.4.2 Analyse des résultats sur la visibilité de la structure bifasciculaire *63*
3.4.3 Analyse des résultats sur le niveau de confiance diagnostique *65*
3.4.4 Limites de l'étude *66*

3.4.5 Perspectives *67*
Conclusion **68**
Bibliographie **69**

Abréviations

LCA : Ligament croisé antérieur

LCP : Ligament croisé postérieur

FAM : Faisceau antéro-médial

FPL : Faisceau postéro-latéral

IRM : Imagerie par résonnance magnétique

DP : Densité protonique

Fat sat : *Fat saturation*

Se : Sensibilité

Sp : Spécificité

VPN : Valeur prédictive négative

VPP : Valeur prédictive positive

Fig. : Figure

UH : Unités Hounsfield

1. Introduction

1.1 Anatomie du ligament croisé antérieur

Le ligament croisé antérieur (LCA) est une structure intra-articulaire, extra-synoviale, stabilisatrice du genou.

Il naît de la face postéro-médiale du condyle fémoral latéral, au niveau de l'échancrure intercondylienne et s'insère sur le plateau tibial médial, autour de l'épine tibiale antérieure [1,2]. Il est oblique d'arrière en avant et de dehors en dedans.

Le LCA mesure en moyenne 31 mm de longueur, 5 mm d'épaisseur et 10mm de largeur[3]. Sa longueur varie en fonction de la flexion du genou, certaines fibres étant cependant isométriques.

Le LCA est composé de fibrilles de collagène groupées en fibres de 1 à 20 µm. Ces fibres ligamentaires se groupent elles-mêmes en unités sous-fasciculaires qui composent deux faisceaux[4–6] définis par des rôles fonctionnels différents. Les deux faisceaux sont nommés d'après leur attache tibiale :

- Le faisceau antéro-médial (FAM), déployé de la partie antérieure de l'insertion tibiale à la partie médiale et proximale de l'insertion fémorale. C'est le plus fin et le plus long des deux faisceaux.
- Le faisceau postéro-latéral (FPL), déployé de la partie postérieure de l'insertion tibiale à la partie distale et latérale de l'insertion fémorale. C'est le plus large et le plus court des deux faisceaux.

Certains auteurs évoquent un faisceau intermédiaire[7–9], très inconstant, situé entre les 2 faisceaux sus-cités.

La zone d'insertion fémorale est ovalaire, de 18x11mm de moyenne, située à la face médiale du condyle fémoral latéral, dans son quart postéro-supérieur[10]. Le grand axe de l'ovale forme un angle moyen de 26° avec le grand axe fémoral (Fig.1).

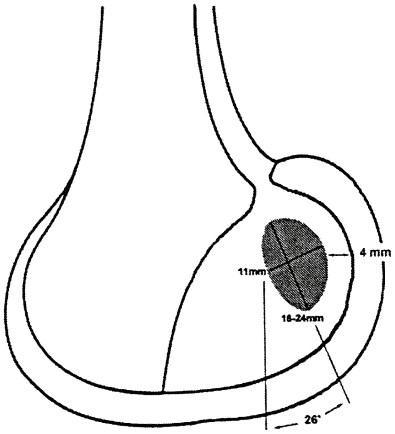


Fig. 1. Zone d'insertion fémorale du LCA. D'après Dienst.[10]

La zone d'insertion tibiale est ovalaire, de grand axe antéro-postérieur, mesurant en moyenne 17x11mm[3], située en avant et latéralement par rapport à l'épine tibiale médiale (Fig. 2).

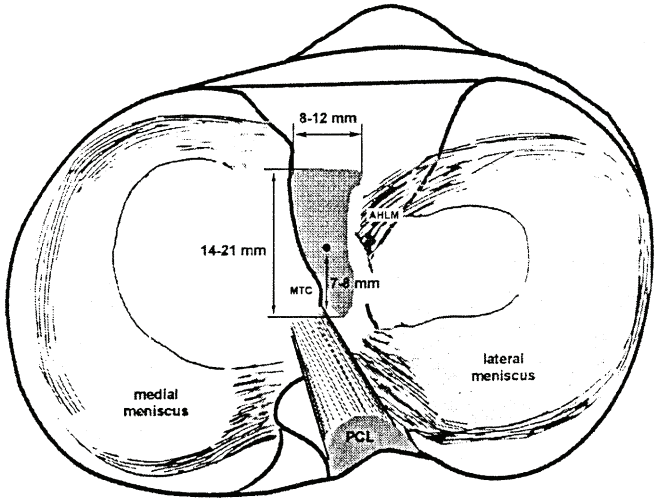


Fig. 2. : Zone d'insertion tibiale du LCA. D'après Dienst.[10]

1.2 Biomécanique du ligament croisé antérieur

Le LCA est le principal obstacle au tiroir antérieur. Il n'a pas d'effet sur le tiroir postérieur[11].

Les deux faisceaux composant le LCA agissent de manière complémentaire pour limiter le déplacement fémorotibial[7] :

- Le FAM limite la translation tibiale antérieure, surtout à plus de 45° de flexion.
- Le FPL, moins isométrique, est plus actif en extension complète[12].

Le FAM se tend avec la flexion du genou, tandis que le FPL est plutôt tendu en extension et en flexion modérée. Le maximum de tension du FPL intervient à 15° de flexion (Fig. 3).

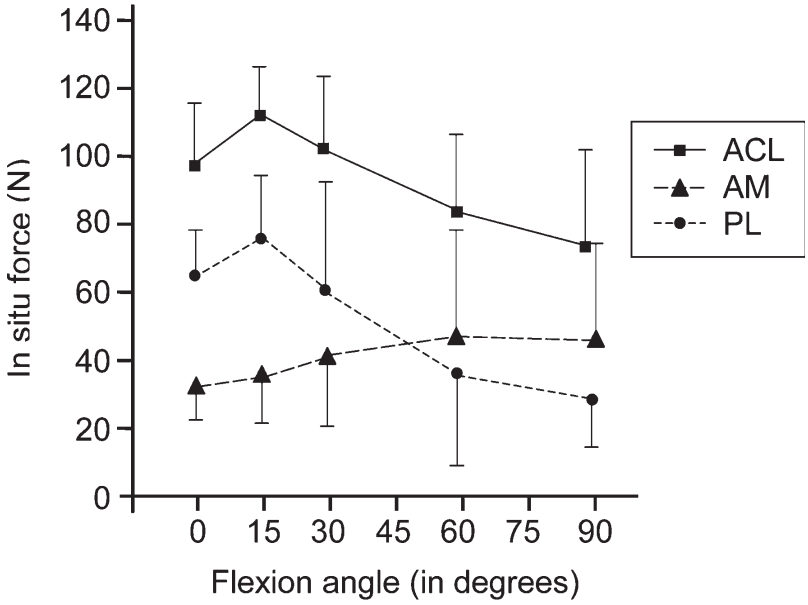


Fig. 3. Mesure des forces in situ au sein du LCA, du FAM et du FPL en fonction du degré de flexion. D'après Duthon.[13]

Le FAM tourne latéralement autour du FPL au cours de la flexion du genou[5,13]. En effet, l'insertion tibiale bouge peu alors que l'insertion fémorale se déplace en avant. La torsion du LCA sur lui-même est d'environ 90° quand le genou est en flexion de 90° (Fig. 4 et 5).

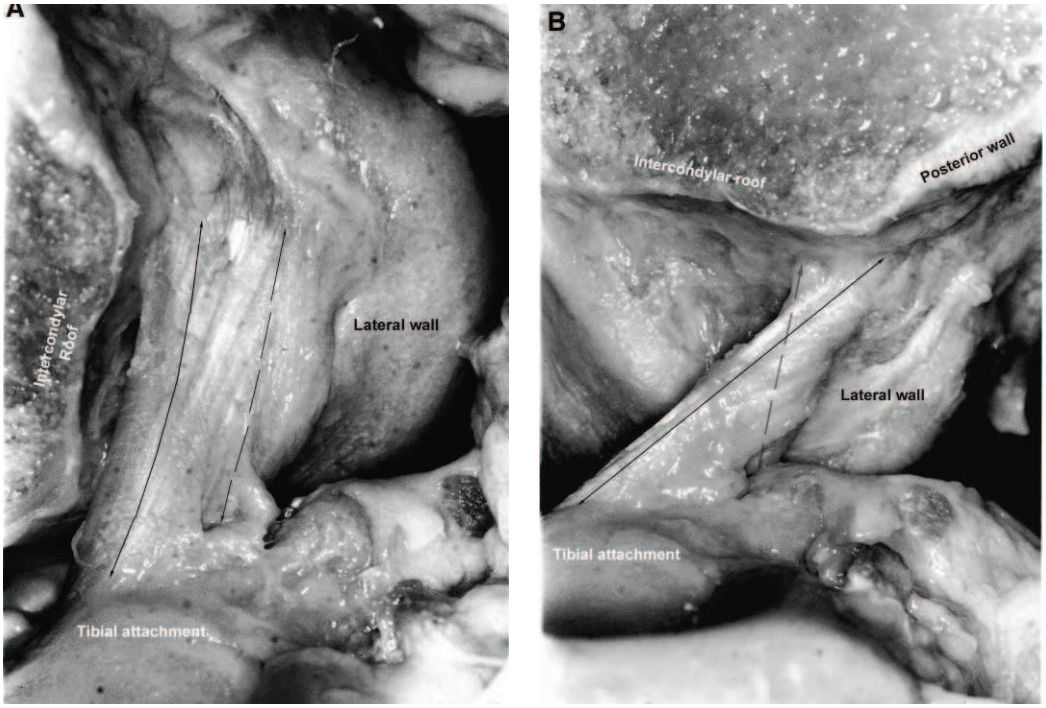


Fig. 4. Coupe anatomique des faisceaux antéro-médial et postéro-latéral en extension et en flexion de 90°. D'après Dienst [10]

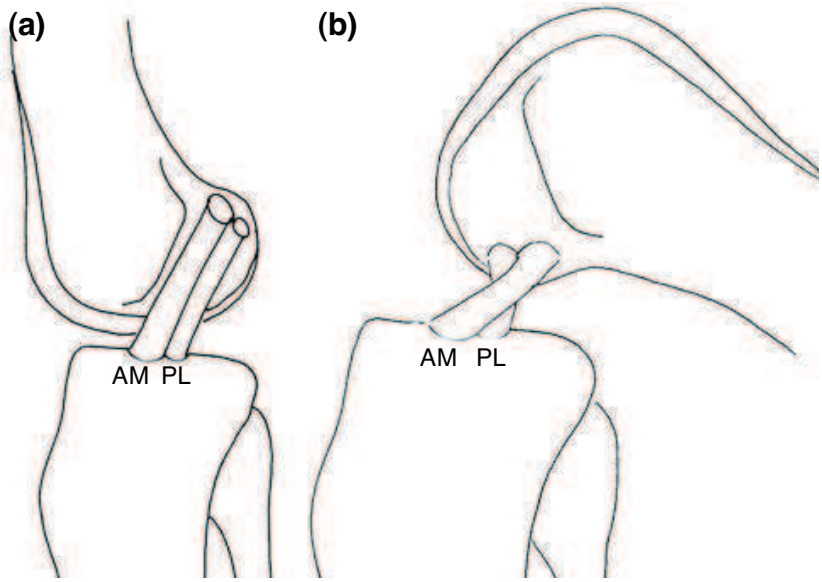


Fig. 5. Schématisation des positions des faisceaux antéro-médial et postéro-latéral en extension (a) et flexion du genou (b) D'après Kaya.[14]

La notion de stabilisateurs primaires et secondaires a été introduite par Bulter[11]. Dans sa conception, la stabilité antérieure du genou est assurée par le stabilisateur primaire qu'est le LCA et par des stabilisateurs secondaires : bandelette ilio-tibiale, ligaments collatéraux, capsules médiale et latérale. Ces stabilisateurs secondaires interviennent surtout en cas de rupture du LCA et sont dépassés en cas de forces trop intenses. Cependant ils peuvent négativer les tests cliniques réalisés avec des forces de contraintes faibles. A la phase chronique de la rupture, les stabilisateurs secondaires jouent un rôle uniquement quand le déplacement articulaire est suffisant[11] .

Le LCA possède un rôle de stabilisateur secondaire en rotation interne. Son rôle dans la stabilisation en rotation externe et en varus-valgus est moindre[11,15].
La stabilité rotatoire est assurée principalement par le FPL grâce à son obliquité qui augmente avec la flexion[5,16].

Après une rupture, le reliquat de LCA peut former un pont entre le tibia et le toit de l'échancrure ou le LCP. Ces reliquats auraient un certain effet biomécanique, surtout la première année suivant le traumatisme et ils garderaient aussi un effet mécanorécepteur[15].

1.3 Ruptures du LCA

1.3.1 Généralités

L'atteinte du LCA est la plus fréquente des lésions traumatiques du genou, survenant le plus souvent lors d'accidents de sport ou de la voie publique. Son incidence est de 8,1-36,9/100000[17,18]. L'instabilité ligamentaire secondaire à une atteinte du LCA peut induire un handicap ou être à l'origine de pathologies dégénératives articulaires secondaires. Les ruptures traumatiques du LCA sont isolées ou associées à d'autres lésions ménisco-ligamentaires.

Cliniquement, la rupture du LCA s'accompagne parfois d'un craquement, suivi d'une douleur et d'un gonflement du genou. A la phase chronique, la sensation d'instabilité et les épisodes de dérobement limitent la fonction du genou atteint.

Le LCA s'évalue par le tiroir antérieur direct, le test de Lachman, et le ressaut rotatoire. Le test clinique le plus sensible est le test de Lachman, suivi du tiroir antérieur direct et enfin du test rotatoire[19,20]. Le ressaut rotatoire est le test le plus spécifique et peut aider à distinguer un LCA lésé fonctionnel (stable) d'un LCA non fonctionnel (instable)[21].
A la phase aigue, l'hémarthrose peut être abondante, limitant les amplitudes et rendant l'examen clinique moins performant.

1.3.2 Ruptures partielles du LCA

La plupart des ruptures du LCA sont complètes, s'étendant sur les deux faisceaux[12,21,22]. Les ruptures partielles sont moins fréquentes, concernant les deux faisceaux de manière équivalente ou l'un des deux faisceaux de manière prédominante.
Le terme « rupture partielle » est un spectre lésionnel au point de vue anatomo-pathologique incluant la rupture complète d'un seul faisceau (Fig. 6 et 7), les atteintes d'une partie des fibres de l'un ou des deux faisceaux, la rupture interstitielle.
La définition d'une rupture partielle est controversée : il existe des définitions cliniques, IRM, arthroscopiques, fonctionnelles et plurifactorielles[21,23,24].

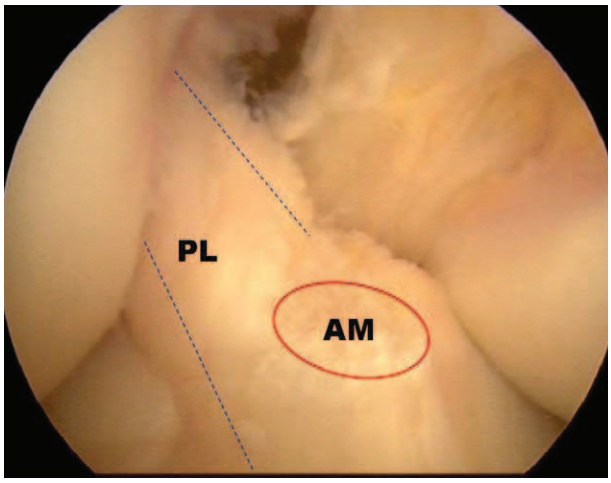


Fig. 6. Rupture isolée du FAM, vue arthroscopique. D'après Colombet[12].

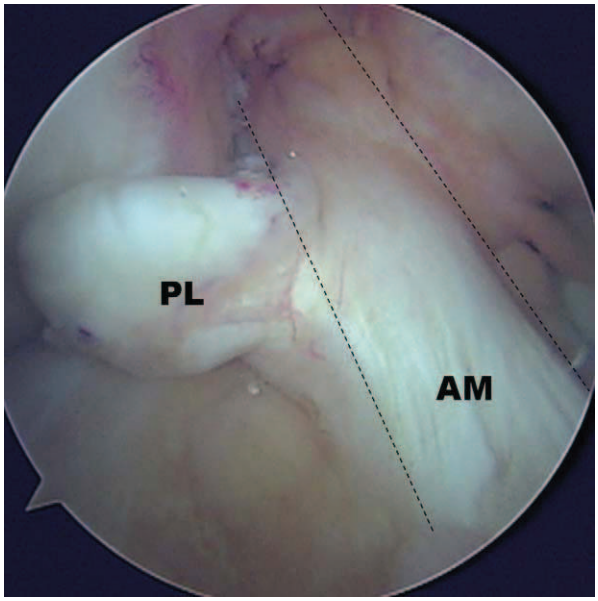


Fig. 7. Rupture isolée du FPL, vue arthroscopique. D'après Colombet[12].

Les ruptures partielles représentent environ 10% des ruptures isolées du LCA en arthroscopie[25]. Ce chiffre pourrait sous-estimer le taux réel car les patients avec une rupture complète sont plus susceptibles d'avoir une arthroscopie que les patients avec une rupture partielle.

Les ruptures partielles sont de diagnostic difficile. La présentation clinique est variable : gonalgies mal localisées, hémarthroses, blocages articulaires. Le diagnostic de rupture partielle isolée doit être évoqué en cas de tiroir modéré avec arrêt dur retardé au Lachman, associé à une différentielle laximétrique égale ou inférieure à 6mm. Le plus souvent, le diagnostic est posé à partir d'un ensemble d'arguments cliniques, laximétriques, IRM et arthroscopiques[12].
Reconnaître les ruptures partielles peut être utile pour plusieurs raisons :

- Les ruptures partielles peuvent évoluer vers la rupture complète.
- Une vascularisation persistante des ruptures partielles, issue de l'artère géniculée médiale, peut induire une réparation[24].
- Des traitements différents de ceux existants pour les ruptures complètes peuvent être proposés, par exemple avec reconstruction d'un seul faisceau[16].

En pratique, Le traitement conservateur a des résultats acceptables dans la majorité des cas car les ruptures partielles ont un potentiel de cicatrisation[21].

1.3.3 Arthroscopie du LCA

L'arthroscopie constitue le *gold standard* dans la plupart des études évaluant les performances de l'IRM ou d'une autre technique d'imagerie dans l'évaluation du LCA. Elle permet de visualiser directement la structure ligamentaire et de la tester mécaniquement au cours de l'intervention. Ce test, réalisé au crochet, évalue notamment l'insertion proximale du LCA, siège fréquent de ruptures.

En cas de rupture, l'arthroscopie en précise le siège et le type.

Si la rupture est ancienne, on peut observer des cicatrisations en nourrice sur le LCP, sur le toit de l'échancrure ou sur la face médiale du condyle latéral.

L'arthroscopie est réalisée à différents degrés de flexion du genou pour optimiser la détection des lésions partielles[26]. La visualisation du faisceau postéro-latéral nécessite un positionnement particulier, en position de Cabot. Les ruptures du FPL peuvent être méconnues si elles ne sont pas spécifiquement recherchées.

Dans certains cas, l'arthroscopie est moins performante pour évaluer le statut du LCA:

- Le tissu ligamentaire peut être le siège d'une déformation plastique et apparaître intact bien que détendu et non fonctionnel.
- Le revêtement synovial peut être préservé et masquer une lésion ligamentaire.
- Le résidu ligamentaire d'une rupture totale attaché à l'échancrure intercondylienne ou au LCP par du tissu cicatriciel, peut être confondu avec un ligament normal ou une rupture partielle.

L'arthroscopie de genou a une précision diagnostique, toutes lésions ménisco-ligamentaires confondues, comprise entre 94 et 98 % selon les études[27,28].

1.4. Moyens d'exploration radiologiques du LCA

1.4.1 Radiographies standard

Les radiographies standard sont indispensables en cas de suspicion de lésion du LCA. Elles ne permettent pas de visualiser directement les structures ligamentaires mais peuvent éliminer d'autres diagnostics comme par exemple une fracture.

Les radiographies standard peuvent mettre en évidence des signes indirects de lésion du LCA :

- un tiroir spontané, qui sous-entend une atteinte des LCA et des stabilisateurs secondaires.
- une exagération de l'encoche normale du tiers moyen du condyle fémoral latéral, en rapport avec une fracture impaction[29]. Ce signe est positif si l'encoche condylienne latérale mesure plus de 2mm de profondeur (Fig. 8).
- une fracture de Segond, qui est une avulsion concernant le rebord tibial latéral, signe quasi pathognomonique de rupture du LCA. Dans sa description classique, cette fracture est reliée à la lésion du tiers moyen du ligament capsulaire latéral. Les structures concernées pourraient en fait être la bandelette ilio-tibiale et la bandelette oblique antérieure du ligament collatéral fibulaire[30] (Fig. 9).
- une fracture du massif des épineuses.
- une fracture ostéochondrale, le plus souvent du bord postéro-latéral du plateau tibial.

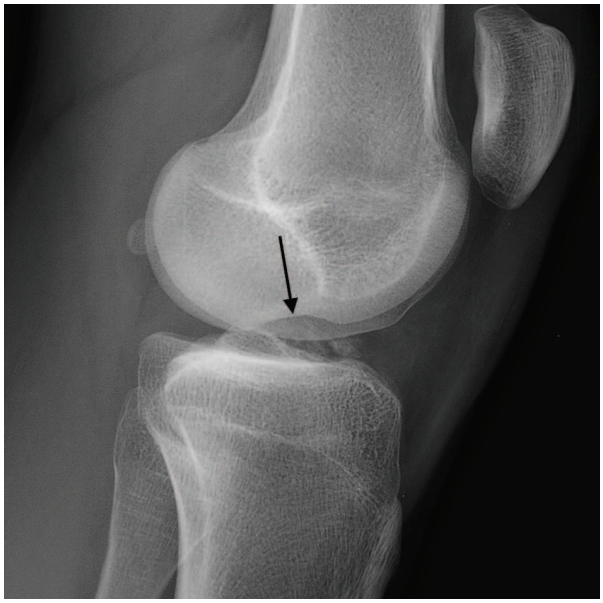


Fig. 8. Fracture impaction du condyle fémoral latéral.



Fig. 9. Fracture de Segond.

1.4.2 Radiographies dynamiques

Les radiographies dynamiques, autrefois réalisées manuellement, sont maintenant instrumentalisées pour plus de praticité, de reproductibilité et de radioprotection des personnels soignants. Plusieurs appareils existent mais tous ont pour principe d'exercer une contrainte de translation tibiale antérieure au cours de la réalisation de radiographies de profil. Ces radiographies permettent la mesure de la translation tibiale avec des repères osseux. La réalisation de radiographies controlatérales rend possible le calcul de la laxité différentielle entre les deux genoux.

Le Telos© (Telos GmbH, Laubscher, Holstein, Suisse) est un des appareils les plus utilisés, reproduisant le test de Lachman en position tenue. Les mesures, comparatives et bilatérales, sont l'avancée du plateau tibial médial sous le condyle médial et l'avancée du plateau tibial latéral sous le condyle latéral.

Le Telos© est l'appareil de référence car performant et reproductible, avec une VPP de 99% et une VPN de 98% à 250N pour un seuil de laxité différentielle de 4mm[31,32].

1.4.3 Arthro-TDM

L'arthro-TDM est invasif et n'est pas l'examen en coupes de référence pour le bilan des lésions ménisco-ligamentaires du genou. Il est réalisé dans les cas où l'IRM est contre-indiquée, indisponible ou de qualité insuffisante (artéfacts métalliques péri articulaires)[33]. Une étude de 2009 a montré une précision diagnostique de l'artho-TDM de 97% sur des LCA natifs et de 92% sur des ligamentoplasties[34]. Une étude de 2002 comprenant 125 genoux avait montré une sensibilité de 90% et une spécificité de 96%[35].

Le premier temps de l'examen est réalisé sous contrôle scopique, comprenant une ponction intra articulaire pour l'injection d'un produit de contraste iodé et la réalisation de clichés arthrographiques. Le second temps est la réalisation d'une hélice scanographique en coupes millimétriques.

Les ligaments croisés apparaissent de densité tissulaire (60-70 UH). Ils sont silhouettés par des replis synoviaux remplis de produit de contraste. Des reconstructions sont possibles dans le plan ligamentaire.

En cas de rupture du LCA, on peut mettre en évidence des signes directs de rupture : absence de visualisation du LCA, présence de produit de contraste au sein du ligament, disparition du bord antérieur de la tente des croisés, aspect détendu du bord antérieur de la tente des croisés, tuméfaction du ligament croisé antérieur. Les signes indirects sont l'hémarthrose, la désinsertion capsulo-méniscale de la corne postérieure du ménisque médial, la lésion de la corne postérieure du ménisque latéral, les lésions cartilagineuses.

1.4.4 Echographie

L'échographie a fait l'objet de très peu d'études pour le diagnostic de rupture du LCA. Cette modalité aurait un intérêt à la phase aigue des traumatismes. La méthode consiste à mesurer le tiroir tibial antérieur avec et sans pression manuelle. C'est une technique peu coûteuse, accessible et qui ne nécessiterait pas ou peu d'expérience avec une courbe d'apprentissage rapide[36], mais qui reste très peu développée.

2. Imagerie par résonnance magnétique des ruptures du LCA

2.1 Généralités

L'IRM est l'examen non invasif de choix pour l'évaluation complète de la pathologie du genou[28,37]. C'est un examen non irradiant, particulièrement adapté à l'étude des parties molles et des structures non osseuses.

Ses performances sont élevées pour l'étude des ruptures du LCA avec une sensibilité de 82,5% et une spécificité de 92,8 % dans une méta-analyse de 2007 regroupant une large gamme d'études réalisées entre 1966 et 2006, sur un total de 7367 examens IRM[38].

L'IRM peut préciser la nature et le siège d'une lésion du LCA suspectée cliniquement et faire le bilan des autres atteintes, osseuses ou ménisco-ligamentaires.

Son rôle exact dans la prise en charge des suspicions de rupture du LCA varie selon les auteurs. Pour certains, l'IRM n'est pas meilleure que la clinique pour l'évaluation de l'état du LCA[39]. L'IRM ne devrait alors pas être systématique dans l'étude des ruptures du LCA.

Pour d'autres, l'IRM pourrait diminuer utilement le nombre d'arthroscopies diagnostiques[40,41]. En effet, certains conçoivent l'IRM comme un bon moyen d'exclure une lésion car la VPN est supérieure à la VPP[42]. En cas de doute diagnostique clinique, il a été montré dans une étude en double aveugle que l'IRM permet de sélectionner les patients nécessitant un traitement chirurgical[43].

2.2 Technologie

2.2.1 Champ magnétique

Dans une étude portant sur 90 patients qui passaient consécutivement deux IRM à puissances de champ magnétique différentes, il a été montré l'absence de différence de performance pour l'évaluation du LCA entre les aimants de faibles champs (<1T) et les champs moyens (1-1,5T)[44]. L'utilisation d'appareil de bas champ nécessite toutefois d'être encore plus attentif à l'homogénéité du champ, à la qualité de l'antenne et des séquences utilisées.

Les performances diagnostiques pour l'évaluation du LCA à 3T rapportées dans la littérature sont excellentes : 100% de sensibilité et de spécificité pour une équipe sur 61 cas[45]. Une autre étude récente, sur 132 patients dont 40 ruptures à l'arthroscopie, obtenait des Se et Sp de 83 et 99% pour les ruptures complètes et de 77 et 97% pour les ruptures partielles[46]. Il n'y a pas d'étude comparant directement les moyens et hauts champs comme il a été fait pour les faibles et moyens champs. Une étude a prouvé les meilleures performances d'un champs élevé de 3T par rapport à 1,5T pour distinguer les deux faisceaux composant le LCA[4].

2.2.2 Installation du patient

Le patient est en décubitus dorsal, le genou à étudier placé dans l'antenne de surface dédiée. Les antennes de surface sont préférables aux antennes *body* car elles offrent une résolution spatiale et un rapport signal sur bruit accrus[47]. Une flexion du genou de 10 à 30° est optimale pour que les deux faisceaux du LCA soient tendus, et que le LCA se décolle du toit de l'échancrure[48,49] (Fig.10).

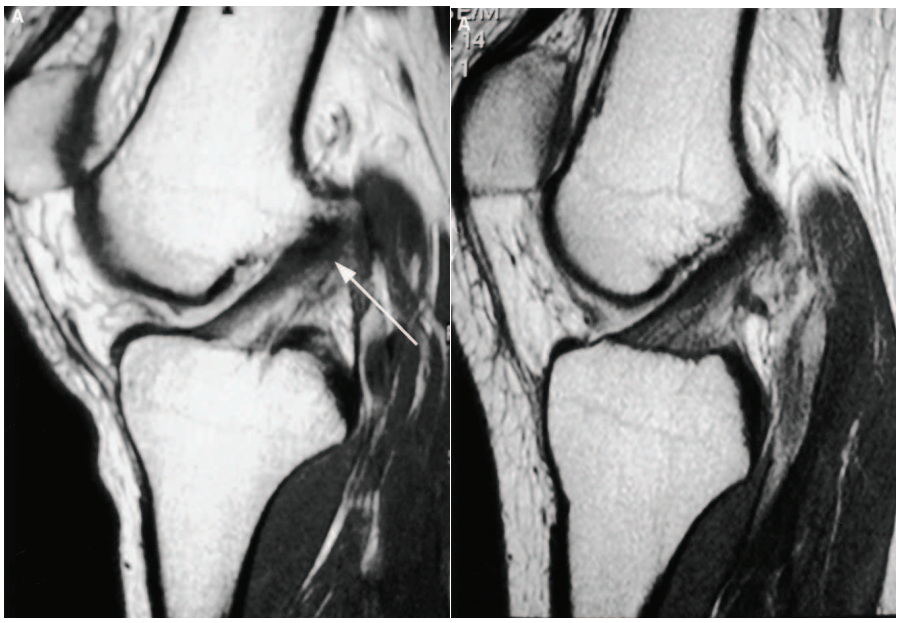


Fig. 10 : Séquence sagittale oblique pondérée T1, en extension complète (image de gauche) et flexion de 30° (image de droite). Majoration du volume partiel à l'insertion fémorale en extension (flèche blanche).

2.2.3 Séquences IRM

Les protocoles les plus fréquemment utilisés sont :

- Un protocole en trois séquences, comportant trois plans en densité de protons (un axial, un sagittal, un coronal) dont un sans saturation du signal de la graisse.
- Un protocole en quatre séquences comportant un plan en pondération T1 sans saturation du signal de la graisse (sagittal le plus souvent) et trois plans (axial, coronal et sagittal) en densité de protons avec saturation du signal de la graisse.

Les séquences sont en *fast spin echo*. Les pondérations T2 et DP, qui favorisent le signal liquidien, sont les plus sensibles pour l'évaluation du LCA et des tissus mous adjacents. Les pondérations T1 sont utiles pour l'analyse des lésions associées osseuses et cartilagineuses.

2.2.3.1 Séquences orthogonales

Ces séquences sont positionnées par rapport aux repères anatomiques de base : grands axes fémoral et tibial pour la séquence axiale, plan bicondylien postérieur pour la séquence coronale, bord externe du condyle latéral pour la séquence sagittale. Leurs orientations ne sont pas liées directement à celle du LCA et sont donc sensibles aux effets de volume partiel qui rendent l'interprétation plus difficile. Ce volume partiel concerne notamment l'origine fémorale[49] où les ruptures du LCA sont les plus fréquentes[12].

Parmi les séquences orthogonales, la séquence axiale est celle qui est préférable pour limiter les effets de volume partiel. Elle a été étudiée isolément avec pour résultat un bon dépistage des lésions instables (ruptures partielles de haut grade et ruptures complètes) par rapport aux lésions stables (LCA normaux et ruptures de bas grade)[22]. Dans cette étude, les auteurs n'avaient pas trouvé de signe correct pour différencier les ruptures partielles stables des LCA normaux et insistaient sur la difficulté d'interprétation de l'insertion tibiale.

2.2.3.2 Séquences obliques

Pour obtenir une visualisation du LCA sur toute sa longueur, l'utilisation de la séquence sagittale oblique parallèle au grand axe du LCA est couramment admise[50,51]. Plusieurs techniques pour obtenir ces séquences sagittales obliques existent : plan parallèle au bord médial du condyle fémoral latéral, 15° d'obliquité par rapport au plan sagittal strict, positionnement à partir de plans coronal et axial [52] (Fig. 11).

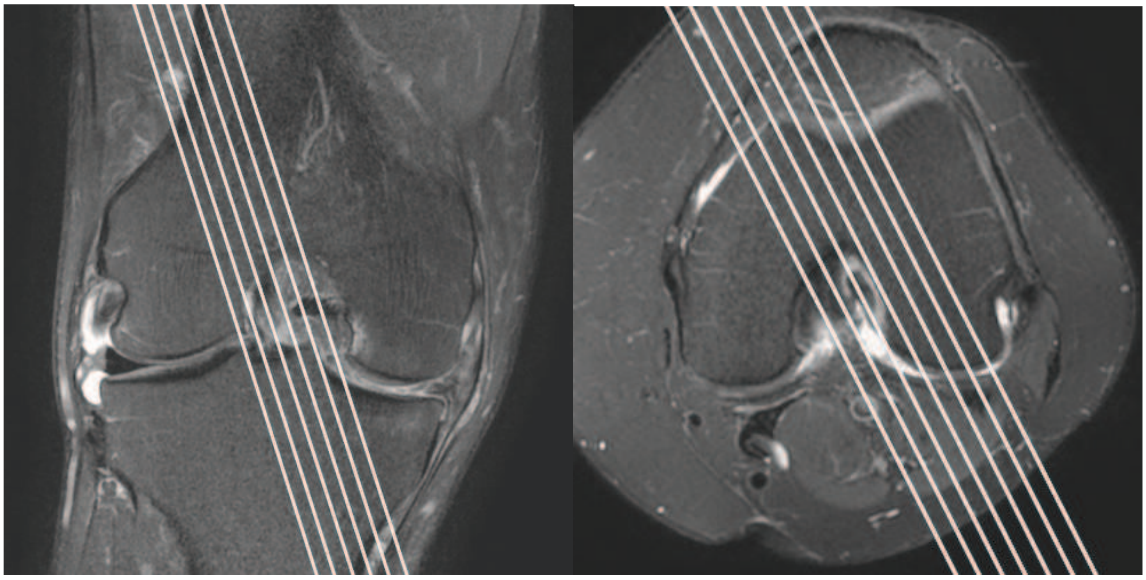


Fig. 11. Obtention de la séquence sagittale oblique à partir d'une coupe coronale (image de gauche) et à partir d'une coupe axiale (image de droite).

La séquence sagittale oblique est utile pour avoir une vision de l'ensemble du LCA sur une ou quelques coupes successives[53]. Malgré tout, dans 5 à 10 % des cas, le LCA reste mal visualisé sur les coupes sagittales obliques[50].

Le plan coronal oblique se rencontre moins fréquemment dans les protocoles d'étude, il a cependant été montré qu'il peut être utile dans certains cas difficiles, comme les lésions chroniques cicatrisées et les lésions partielles[54]. Une étude a montré, sur 169 patients, un gain en spécificité de 84% à 89% avec l'ajout de la séquence coronale oblique avec une sensibilité stable à 95%[23].

Dans toutes les études publiées étudiant une ou plusieurs séquences obliques[23,52–58], les performances étaient accrues par rapport aux séquences orthogonales seules, quelle que soit la méthode privilégiée pour obtenir les séquences obliques. Ainsi, une étude réalisée

à 1,5 T sur 101 patients a démontré l'apport de l'ajout de l'une ou l'autre des séquences obliques (coronale ou sagittale) à un protocole composé uniquement de séquences orthogonales mais n'a pas montré d'amélioration significative de la performance diagnostique en ajoutant simultanément les deux séquences au protocole classique[54].

La séquence axiale oblique est de loin la séquence oblique la moins fréquemment rencontrée dans les protocoles d'étude du LCA. Une seule étude, datant de 2012, a été publiée à ce jour pour l'évaluation des performances diagnostiques de cette séquence, comparant ses performances à celle de séquences orthogonales[57]. En France, son usage est pour l'instant limité à quelques centres hospitalo-universitaires.

2.2.3.2 Séquences 3D

Les séquences 3D isotropiques, qui réalisent une acquisition volumique en écho de gradient ou plus récemment en spin écho, sont une alternative aux séquences obliques. Elles permettent la visualisation des structures dans le plan oblique souhaité (axial, sagittal ou coronal obliques) à l'aide de reconstructions multiplanaires rendues possibles par le caractère isotropique de l'acquisition native. Ces séquences nécessitent cependant un long temps d'acquisition à l'origine d'artéfacts de mouvement.
Le rapport signal sur bruit reste en deçà de celui obtenu avec les séquences 2D à 1,5T et la qualité des images reconstruites n'est pas optimale[56]. Des perspectives prometteuses existent cependant pour ces séquences avec l'utilisation de hauts champs qui devrait permettre d'augmenter la finesse des coupes et le rapport signal sur bruit[59].

2.3 Aspects remnographiques du LCA normal

2.3.1 Anatomie du LCA en coupes orthogonales

Le LCA a une orientation normale oblique de l'origine fémorale à l'insertion tibiale. Sa morphologie normale est celle d'une bande linéaire régulière[28] (Fig. 12). L'intensité de son signal est homogène et basse en pondérations T1, DP et T2, sauf au

niveau de l'insertion tibiale où le signal est plus hétérogène et en moyenne plus élevé[60,61].

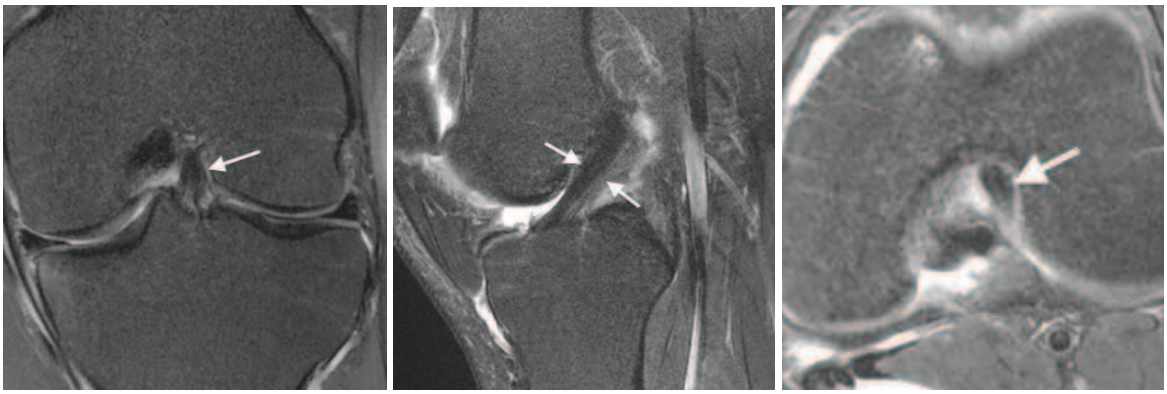


Fig. 12. LCA normal (flèches blanches) en séquences coronale, sagittale et axiale DP fat sat (de gauche à droite respectivement).

Sur les images sagittales, genou en extension, les faisceaux du LCA sont relativement parallèles[13]. Le FPL est alors tendu tandis que le FAM est détendu[16].
Le bord antérieur du LCA est presque parallèle à la ligne de Blumensaat (toit de l'échancrure) et forme un angle d'environ 45° avec le grand axe tibial. En pratique, le LCA n'est visible que sur une à trois coupes sagittales en fonction de l'épaisseur de coupe utilisée.

Sur les images coronales, on peut suivre le trajet du LCA sous forme d'une bande oblique de signal bas et homogène dans ses deux tiers proximaux et de signal plus élevé sur son tiers distal. La visualisation se fait sur trois ou quatre coupes successives en fonction de l'épaisseur de coupe.

Sur les images axiales, le LCA a une forme ovoïde dans sa portion proximale en contact étroit avec le bord médial du condyle fémoral latéral. Dans sa portion intermédiaire, le LCA devient plus elliptique en raison de son obliquité. Dans sa portion distale, il est d'analyse difficile en raison de l'obliquité marquée de l'insertion tibiale et du signal distal naturellement plus élevé. En pratique, le LCA est visible sur quatre à cinq images axiales.

2.3.2 Anatomie du LCA en coupes axiales obliques

Le signal au sein du FPL est relativement plus hétérogène que celui du signal du FAM avec un signal plus élevé dans sa portion latérale[2].

On peut schématiquement délimiter 3 portions :

- L'insertion fémorale : les faisceaux apparaissent oblongs, avec un FAM de signal bas et homogène et un FPL de signal discrètement plus élevé, également homogène. Les deux faisceaux sont au contact l'un de l'autre et de taille à peu près similaire (Fig. 13).

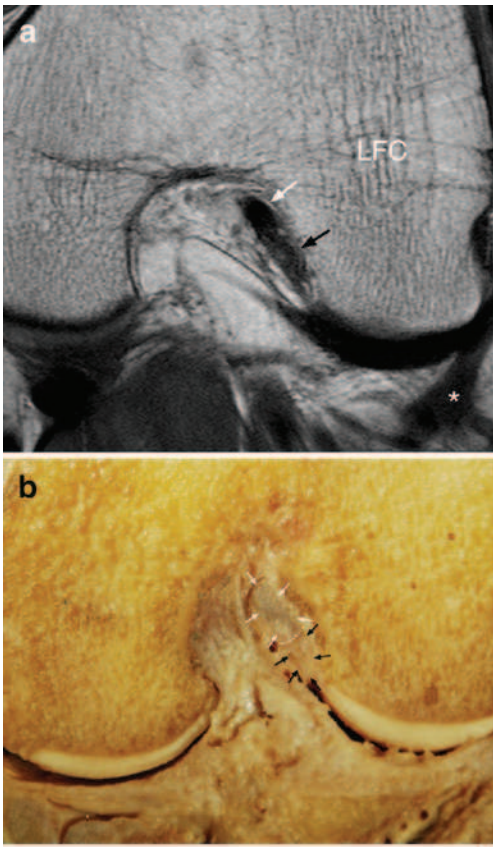


Fig. 13. FAM (flèches blanches) et FPL (flèches noires) à l'insertion tibiale. a : séquence axiale oblique; b : section anatomique correspondante (D'après Ng[57]).

- La portion intermédiaire : les deux faisceaux deviennent plus compacts et arrondis, sans portion graisseuse notable (Fig. 14).

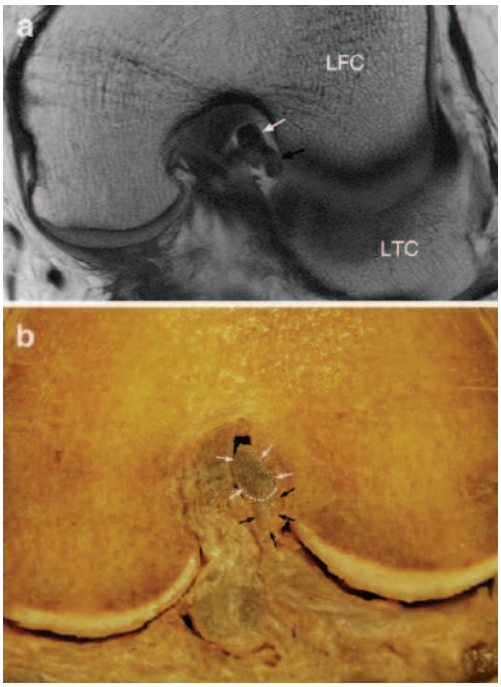


Fig. 14. FAM (flèche blanche) et FPL (flèche noire) dans leurs portions intermédiaires. a : séquence axiale oblique; b : section anatomique correspondante (D'après Ng. [57])

- L'insertion tibiale : le FAM a une forme de C, entourant le PFL. Il a un signal homogène, de faible intensité, entourant une plage centrale de plus forte intensité. Le FAM s'insère sur la partie antéro-médiale de la zone d'insertion tibiale. Le FPL correspond à un ensemble de fibres moins bien arrangées, séparées par un tissu de signal graisseux. Il s'insère de manière plus postérieure et latérale (Fig. 15).

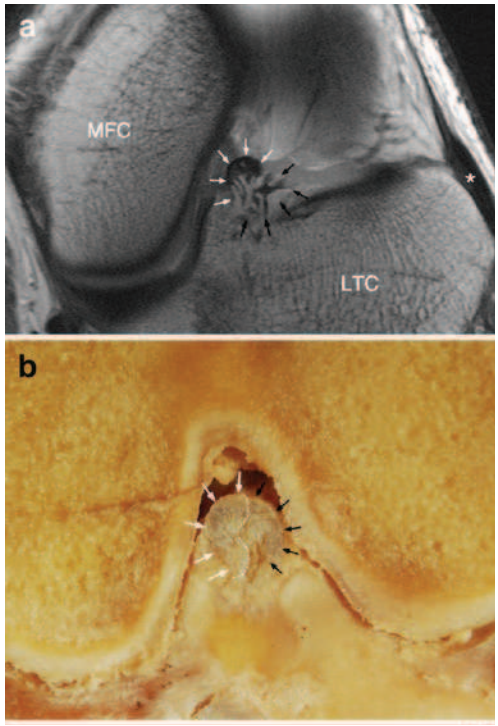


Fig. 15. FAM (flèches blanches) et FPL (flèches noires) à l'insertion tibiale. a : séquence axiale oblique; b : section anatomique correspondante (D'après Ng[57])

2.4 Sémiologie IRM des ruptures du LCA

Les ruptures sont de différents types allant de la rupture partielle de bas grade jusqu'à la rupture complète des deux faisceaux. Pour chaque faisceau, la localisation de la rupture peut être proximale, intermédiaire ou distale.

2.4.1 Signes directs

Les signes directs de rupture du LCA sont[60,62]:

- Absence ou discontinuité du signal normal, contours anormaux (Fig. 16).
- Ligament mal visualisé car signal non homogène ou variable.
- Ligament visualisé mais non respect des insertions anatomiques normales (Fig. 17).
- Ligament non visualisé, signe de l'échancrure vide (Fig.18).
- Masse amorphe du LCA.

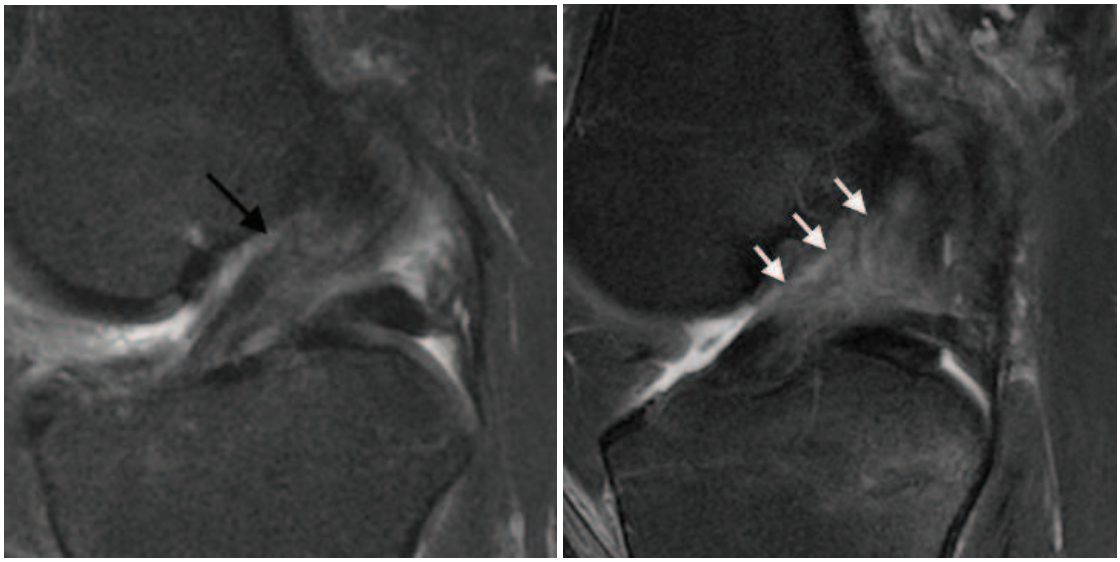


Fig. 16. Coupes sagittales obliques DP fat sat chez des patients avec une rupture du LCA. Hypersignal intra-ligamentaire et contours anormaux du LCA (flèche noire). Hypersignal ligamentaire plus marqué (flèches blanches) chez un autre patient.

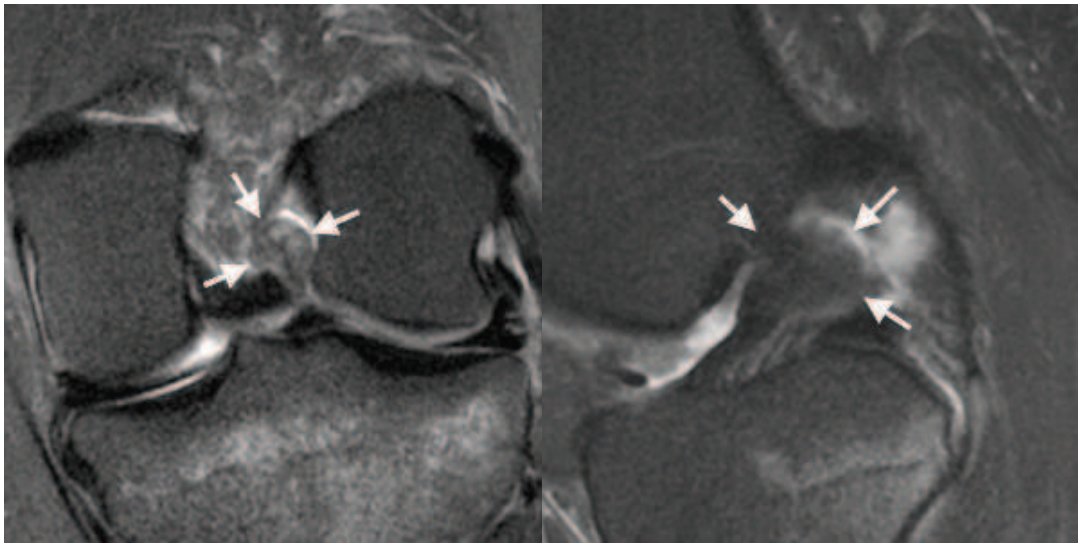


Fig. 17. Images coronales et sagittales DP fat sat. LCA rompu à son insertion avec moignon de forme bulbaire (flèches blanches).



Fig. 18. Signe de l'échancrure vide (flèches noires). Séquence coronale DP fat sat.

La plupart des ruptures interviennent dans la portion moyenne ou à l'insertion proximale car l'insertion tibiale est relativement plus solide. L'avulsion du LCA par son insertion tibiale est plus fréquente chez le sujet jeune[63].

Rarement, le résidu d'une rupture complète du LCA peut venir se piéger entre le condyle fémoral et le plateau tibial, réalisant un tableau clinique de blocage, avec impossibilité d'extension complète du genou. Ces résidus de LCA peuvent prendre deux formes : bulbaire, réalisant une image proche d'un syndrome du cyclope ou une image plus allongée, en languette, avec angulation antérieure localisée (Fig. 19)[64].

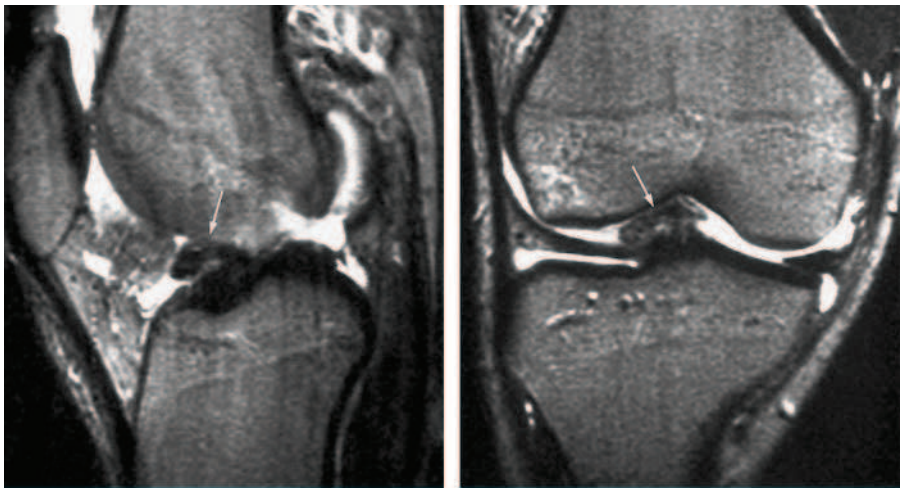


Fig. 19. Sagittale et coronale T2 montrant un reliquat de LCA rompu incarcéré dans le récessus articulaire antérieur (flèches blanches). D'après Huang[64].

2.4.2 Signes indirects

Les lésions associées comprennent les contusions osseuses, les fractures, les lésions méniscales, la subluxation tibiale antérieure et les autres lésions ligamentaires. Ces signes indirects de rupture du LCA sont surtout utiles quand il est difficile de conclure avec les signes directs seuls[65].

Les contusions osseuses sont classiquement localisées au condyle fémoral latéral et au rebord postéro-latéral du plateau tibial (Fig.20). Ces localisations peuvent cependant varier en fonction du mécanisme traumatique et concerner le compartiment médial. Les contusions osseuses du compartiment latéral sont les signes indirects de rupture les plus utiles[65]. Elles continuent à se voir au-delà de la phase aigue pendant plusieurs semaines voire plusieurs mois[62].

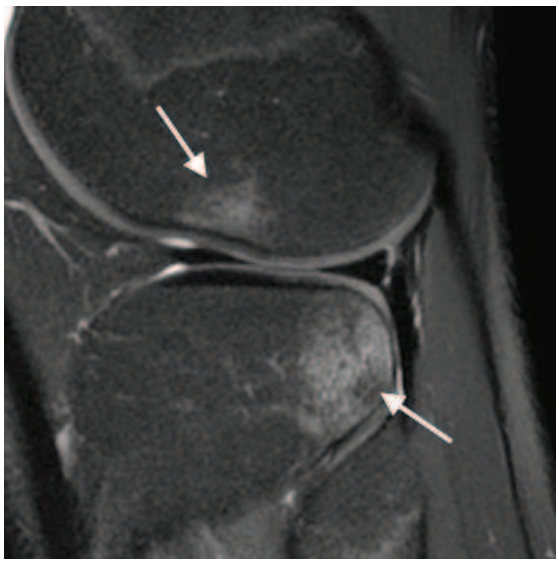


Fig. 20. Contusions osseuses du condyle fémoral latéral et de la partie postérieure du plateau tibial latéral (flèches blanches), typiques d'un mécanisme lésionnel de rupture du LCA.

Les lésions méniscales associées à une rupture du LCA sont habituellement des fissures méniscales verticales localisées aux cornes postérieures. Une lésion de ce type, notamment du compartiment latéral, fait suspecter une rupture du LCA[62].

Une subluxation antérieure du tibia par rapport au fémur peut être observée sur les coupes sagittales. Des lignes verticales tangentes aux bords postérieurs du condyle fémoral latéral et du plateau tibial latéral sont tracées sur une coupe sagittale passant par le tiers moyen du condyle fémoral latéral. Le signe de la translation tibiale antérieure est considéré présent au delà de 5 à 7 mm de translation tibiale antérieure (Fig. 21)[66].

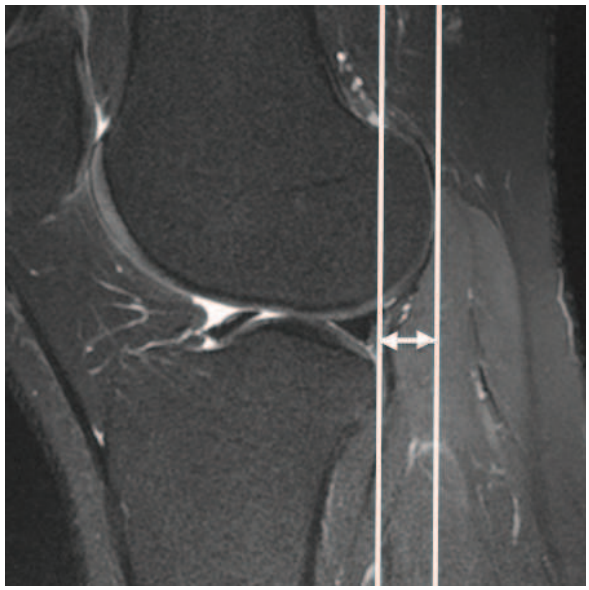


Fig. 21. Coupe sagittale DP fat sat. Mesure de la translation tibiale antérieure. Ici, valeur pathologique.

La translation tibiale antérieure peut être la cause d'une découverture de la corne postérieure du ménisque latéral et peut aussi entrainer une boucle anormale du LCP. Le LCP présente alors une perte de la convexité de son bord postéro-inférieur. Ce signe peut être objectivé en traçant une ligne parallèle au LCP dans sa portion distale. Si cette ligne croise le cortex fémoral dans ses 5 cm les plus postérieurs, le signe est présent. Cependant, cet aspect du LCP peut être observé sans rupture de LCA. Les contours du LCP peuvent par exemple être modifiés en hyperextension.

Enfin, une lésion du ligament collatéral médial, avec ou sans rupture, peut être associée à une rupture du LCA.

2.4.3 Signes quantitatifs

2.4.3.1 Mesures d'angle

Plusieurs mesures d'angle différentes ont été décrites pour évaluer quantitativement et objectivement le statut du LCA[67,68].

Mellado *et al* ont ainsi décrit trois angles différents (Fig. 22) :

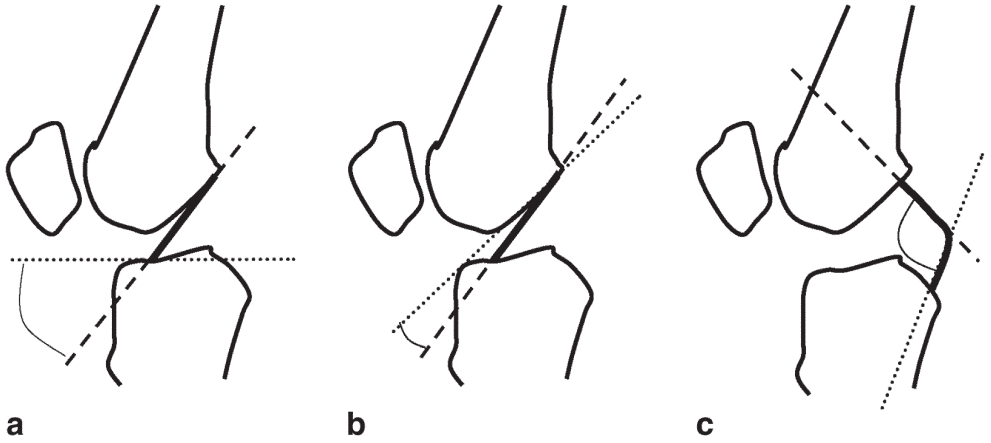


Fig. 22. *ACL angle* (a). Angle de Blumensaat (b). *PCL angle*(c).

- Le *« ACL angle*» est l'angle formé par la tangente au bord antérieur de la portion distale du LCA et la face la plus antérieure de l'éminence intercondylienne. Il reflète quantitativement la position « couchée » que prend le LCA rompu en distalité.
- L'angle de Blumensaat est l'angle entre la tangente au bord antérieur de la portion distale du LCA et la ligne de Blumensaat.
- Enfin, le « *PCL angle* », souvent cité dans la littérature, reflète quantitativement la modification de courbure du LCP secondaire à la rupture du LCA. C'est l'angle formé par les tangentes aux portions distale et proximale du LCP.

Le « *ACL angle* » est la mesure d'angle la plus performante pour le diagnostic des ruptures de LCA, avec une sensibilité et une spécificité de 100% pour un seuil fixé à 45° pour les 100 patients de l'étude de Mellado *et al*.

2.4.3.2 IRM dynamique

La combinaison de l'IRM et de tests dynamiques statiques donnerait de bons résultats[69,70]. Le principe est d'analyser des signes indirects de rupture en translation antérieure et postérieure. Ces techniques restent peu développées car elles nécessitent l'élaboration de jambières en fibres de verres compatibles IRM (Fig. 23).

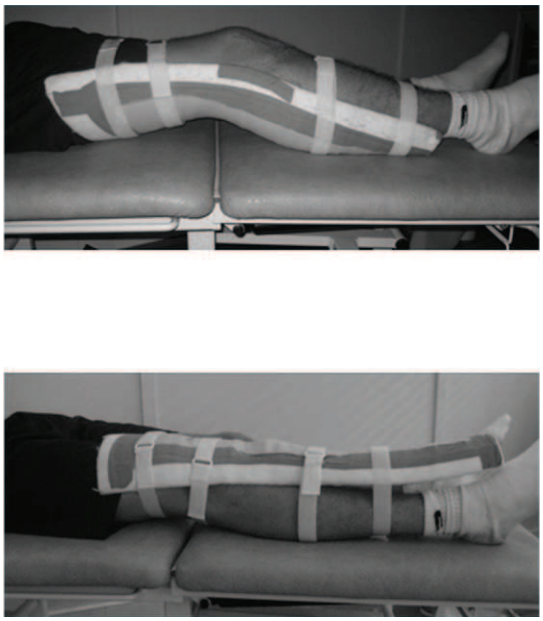


Fig. 23. Jambières en fibre de verre pour IRM dynamique. D'après Al dadah[69].

2.5 Pièges et difficultés d'interprétation

2.5.1 Ruptures partielles

L'IRM de genou classique n'est pas performante pour le diagnostic d'une rupture partielle, que ce soit à 1,5T[56,67] ou à 3T[46]. Une des causes est le chevauchement important des signes entre rupture partielle et complète[71]. Une rupture partielle peut être difficile à diagnostiquer en IRM et le LCA peut être à tort considéré comme normal lors de l'interprétation.

Différents signes de rupture partielle ont été décrits :

- signal anormal focal au sein du ligament, qui garde par ailleurs des contours normaux[44].
- fibres de signal normal, mais anormalement ondulées sur les séquences sagittales ou coronales[72].
- fibres résiduelles constituant un ligament anormalement mince mais continu[62,73].
- visualisation d'un seul des deux faisceaux sur les séquences axiales[22].

Des deux faisceaux, le FAM est le plus souvent atteint[74,75].

2.5.2 Effet de volume partiel

L'effet de volume partiel est un phénomène bien connu car rencontré quotidiennement en imagerie en coupes. Il est du à une résolution spatiale trop faible qui fait confondre au sein d'un même voxel le signal lié à la structure à étudier avec le signal lié aux structures avoisinantes. Le signal observé au sein du voxel est en effet la moyenne du signal des différents composants du voxel. Cet effet est d'autant plus marqué que la structure à étudier est petite et que la résolution spatiale est faible (*i.e.* que le voxel est grand). En pratique, cela se traduit par un effet de flou sur les contours de la structure d'intérêt, notamment si le plan de coupe est oblique par rapport aux contours de la structure.
Appliqué à l'évaluation du LCA, cela signifie que le signal de la structure ligamentaire (oblique dans les trois plans) est moyenné avec son environnement immédiat (liquidien, graisseux ou osseux), dans des proportions variables dépendant des paramètres de la séquence (notamment la taille du voxel et le plan de coupe). Le volume partiel est responsable à la fois de faux négatifs et de faux positifs IRM.

Ainsi, les ruptures très proximales sont d'analyse plus difficile en raison du volume partiel fréquemment observé autour de l'insertion fémorale[48].

L'interprétation multiplanaire rigoureuse doit permettre en partie de limiter les erreurs d'interprétation.

2.5.3 Autres causes de faux négatifs

La synovialisation du LCA est un phénomène de réparation qui consiste en la prolifération d'un tissu de granulation cicatriciel, fonctionnellement incompétent mais qui peut simuler un LCA intact[76]. Cette synovite réactionnelle autour du LCA a de multiples causes possibles : traumatisme, chondrocalcinose, polyarthrite[28].

Les ruptures anciennes, partielles ou complètes, peuvent se cicatriser et regagner une continuité. Ce tissu cicatriciel est cependant moins résistant que le tissu d'origine. En IRM, le signal T2/DP initialement élevé a tendance à diminuer, ce qui peut complètement masquer des lésions anciennes. Du tissu cicatriciel peut se former entre le LCA et le LCP ou l'échancrure intercondylienne.

2.5.4 Autres causes de faux positifs

En distalité, le signal du LCA est plus élevé car les fibres du LCA peuvent être séparées par de fines travées graisseuses et du tissu conjonctif. Ce signal plus élevé ne doit pas être confondu avec des signes de rupture.

La dégénérescence mucoïde et/ou le développement d'un kyste mucoïde peuvent également être trompeurs, se traduisant par un hypersignal T2 intra-ligamentaire, cependant sans interruption des fibres du ligament. Il faut rechercher une origine traumatique préexistante. Les kystes mucoïdes peuvent déplacer le ligament normal et être confondus avec une lésion du LCA.
La dégénérescence mucoïde et les kystes mucoïdes sont liés et peuvent coexister.

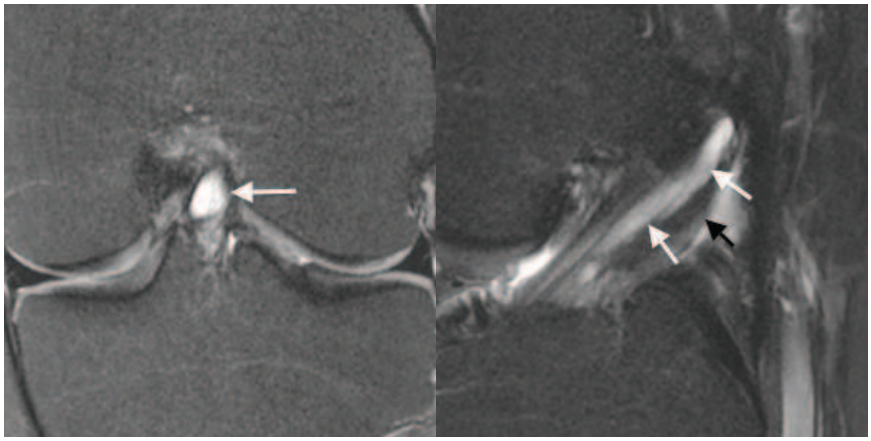


Fig. 24. Images coronale et sagittale DP fat sat. Kyste du LCA (flèches blanches) refoulant les fibres du LCA en arrière (flèche noire).

Enfin, rarement, le LCA peut être hypoplasique ou absent de manière congénitale.

3. Etude

3.1 Introduction

Pour l'étude des ruptures du LCA, l'IRM est le meilleur examen non invasif de détection, permettant notamment de faire le bilan des lésions ligamentaires et méniscales associées[38]. De nombreuses études ont analysé les performances de l'IRM pour l'évaluation du statut du LCA et les résultats sont très variables en fonction du design des études et des séquences utilisées[37,38]. Les protocoles IRM s'éloignent parfois beaucoup de la pratique quotidienne. La plupart des études insistent sur les performances élevées de l'IRM. Cependant, la méta analyse de Crawford[38] indique une sensibilité moins bonne que la spécificité. Localement, un résultat similaire a été retrouvé dans une étude prospective récente[19]. Il apparaît donc que l'évaluation ligamentaire reste un challenge quotidien et que dans certains cas difficiles les séquences et critères diagnostiques classiques ne sont pas suffisants pour statuer de manière précise sur une rupture du LCA[19,40,68].

Brandser *et al* ont montré une supériorité des signes directs par rapport aux signes indirects pour l'étude des ruptures du LCA[65]. Ainsi, le but de nombreuses études a été de progresser sur la visualisation directe de la structure ligamentaire et de son environnement immédiat. L'anatomie du LCA est complexe, et les séquences classiques ne peuvent prétendre à une parfaite représentation du volume que représente le LCA. Différentes solutions ont été proposées : l'utilisation de protocoles multiplanaires[61], de séquences obliques coronales et sagittales[23,52–58], un placement adapté du genou dans l'antenne[48].

La séquence axiale oblique est séduisante car elle permet de réaliser une lecture « en coupes» qui reflète mieux la complexité de la structure et notamment son caractère bifasciculaire. Elle permet l'analyse du LCA sur onze à quinze coupes axiales obliques successives au lieu de deux à trois coupes pour la séquence sagittale oblique. Avec les séquences du protocole classique, le faible nombre de coupes et l'orthogonalité souvent imparfaite par rapport à la structure à étudier rend difficile la distinction entre volume partiel et image pathologique, altérant la performance diagnostique et la confiance du lecteur. En permettant une meilleure distinction anatomique du LCA et de ses deux

faisceaux, mais également une meilleure visualisation de l'environnement péri-ligamentaire, la séquence axiale oblique devrait améliorer la détection des lésions ainsi que la précision de leur description. De plus, elle devrait augmenter la confiance diagnostique du lecteur.
Une séquence IRM réalisée dans un plan de coupe axial oblique a été introduite en mars 2010 au CHU de Rouen, dans le but d'augmenter les performances dans l'étude des ruptures du ligament croisé antérieur, de permettre une meilleure sélection des patients éligibles à une arthroscopie thérapeutique et d'améliorer la prise en charge de ces patients. Notre étude avait pour but de valider ou d'invalider l'usage de cette séquence axiale oblique en pratique quotidienne.

3.2 Matériel et méthode

3.2.1 Patients

Nous avons repris les dossiers de 1261 patients explorés par IRM entre juin 2010 et décembre 2011 au CHU de Rouen. Durant cette période, la séquence axiale oblique avait été ajoutée au protocole classique pour toute demande d'IRM de genou.

Les critères d'exclusion étaient : un protocole IRM incomplet (manque de temps, oubli), une ou plusieurs séquences non interprétables (problème technique, artéfacts), absence d'arthroscopie réalisée dans les six mois suivant l'IRM, arthroscopie réalisée en dehors du CHU de Rouen, antécédent de chirurgie du LCA sur le genou étudié, traumatisme du genou entre la réalisation de l'IRM et l'arthroscopie.

Après application des critères d'exclusion, nous avons obtenu une cohorte de 67 patients, dont l'âge moyen était de 35 ans (compris entre 11 et 62 ans). La cohorte comportait 50 hommes et 17 femmes. Tous les patients présentaient une symptomatologie du genou, avec ou sans traumatisme retrouvé à l'interrogatoire, justifiant la réalisation de l'IRM. La moyenne du délai entre le traumatisme éventuel et l'IRM était de 20 jours (3-262 jours). 20 patients avaient été adressés pour traumatisme récent du genou (inférieur à un mois), 24 patients pour bilan d'un traumatisme datant de plus d'un mois. Chez 23 patients, il n'y avait pas d'épisode traumatique relevé à

l'interrogatoire et les motifs de réalisation de l'IRM étaient : gonalgies (8 cas), épisodes de blocage (2 cas), suspicion de pathologie méniscale (13 cas).
Nous avons examiné 42 genoux droits et 35 genoux gauches.
L'indication d'une arthroscopie était posée par un chirurgien orthopédiste du CHU, aux vues de la clinique et des résultats de l'IRM. Le délai moyen entre l'IRM et l'arthroscopie était de 84 jours (3-221jours).

3.2.2 Protocole d'acquisition

Les images ont été acquises avec une IRM Signa HDxT 1,5 T General Electrics avec une antenne genou QuadKnee General Electrics. Le patient était placé en décubitus dorsal, le genou en légère flexion (environ 20°). Notre antenne genou induisait de manière naturelle une flexion modérée d'environ 15 à 20°, ajustable à l'aide de cales. La flexion du genou ne devait pas être trop prononcée sinon les deux faisceaux du LCA aurait été moins parallèles, et les coupes axiales obliques moins orthogonales aux deux faisceaux.

Les paramètres des séquences utilisées sont exposés au Tableau 1.
Le protocole standard comprenait un plan axial, un plan coronal parallèle au plan bicondylien et un plan sagittal oblique dans l'axe du LCA (coupes positionnées à partir des coupes coronales).
Le protocole standard était d'une durée d'environ 9 minutes.

Paramètre	Axiale Oblique DP	Séquences IRM du protocole standard Spin Echo		
		Axiale DP	Coronale DP	Sagittale oblique DP
Temps de répétition/temps d'écho	2640/45	4080/55	2260/54	3520/55
Champ de vue (mm)	170x170	220x176	200x200	180x180
Epaisseur de coupe (mm)	2	3	3,5	3,5
Espace intercoupe(mm)	0,5	1	1	1
Matrice d'acquisition	384x 256	384x 384	416 x416	384x 384
Longueur du train d'écho	9	13	10	13
Largeur de bande (Hz/pixel)	20,83	35,71	35,71	41,67
Nombre d'excitations	3	3	3	2
Temps de la séquence	4min03	2min31	2min28	3min38

Tableau 1. Paramètres des séquences IRM utilisées.

La séquence axiale oblique était réalisée en fin d'examen. Elle durait 4 minutes et 3 secondes. Le positionnement de la séquence axiale oblique était réalisé à partir des séquences coronale et sagittale oblique (Fig.25). La séquence axiale oblique présentait une obliquité dans les trois plans de l'espace qui permettait d'analyser transversalement la structure ligamentaire. La pondération de la séquence axiale oblique était intermédiaire (TE = 2640, TE = 45) avec un TE plus court que celui des séquences classiques. Le champ de vue était inférieur à celui des séquences classiques (170x170mm). L'épaisseur de coupe (2mm) et l'espace intercoupe (0,5mm) étaient également inférieurs à ceux d'une séquence classique. La matrice d'acquisition était de 384x256, permettant d'obtenir des pixels d'environ 0,5mm.

La séquence axiale oblique avait donc plusieurs avantages théoriques sur les séquences classiques pour la visualisation du LCA :

- Le TE plus court sensibilisait la recherche d'anomalie de signal intra- ou péri-ligamentaires.

- le champ de vue et l'épaisseur de coupe étaient réduits, améliorant la résolution spatiale. Cette résolution spatiale devait permettre de mieux distinguer les deux faisceaux du LCA et de mieux identifier leurs anomalies de signal ou de contours.
- l'amélioration de la résolution spatiale nous a permis de nous affranchir de la saturation de graisse, habituellement utilisée pour sensibiliser la détection d'hypersignaux anormaux. Conserver le signal de la graisse constituait une restitution de l'information par rapport aux séquences DP fat sat et permettait une analyse plus anatomique des structures.
- Enfin, le plan de coupe lui-même, perpendiculaire au grand axe du LCA, diminuait les effets de volume partiel et devait permettre de mieux voir le ligament mais aussi l'environnement péri-ligamentaire immédiat.

Le protocole standard a été dénommé protocole 1. Le protocole incluant les séquences du protocole standard plus la séquence axiale oblique a été dénommé protocole 2.

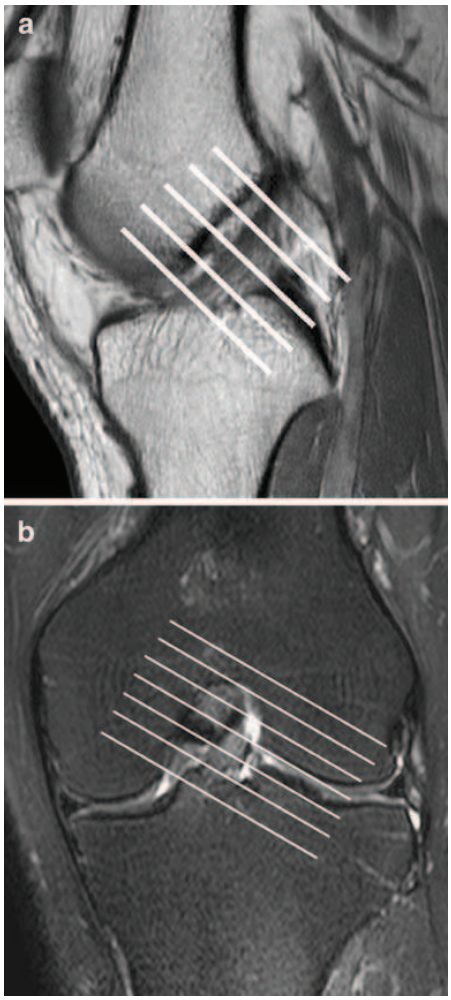


Fig. 25. Positionnement des coupes axiales obliques. a : sagittale densité de protons ; b : coronale densité de protons et saturation du signal de la graisse.

3.3.3 Interprétation des images IRM

Les images ont été interprétées par deux lecteurs différents : un radiologue senior expert en imagerie ostéo articulaire (lecteur 1) et un interne de DES radiodiagnostic en fin de cursus (lecteur 2).

Les lecteurs n'avaient pas d'information clinique ou radiologique sur les patients. Ils ne connaissaient pas les résultats d'arthroscopie. Ils ont revu indépendamment et rétrospectivement les images IRM de dossiers anonymisés, sur des consoles diagnostiques PACS (Impax©, AGFA HealthCare, Ivry-sur-Seine, France). Chaque lecteur a réalisé une interprétation du protocole 1 et du protocole 2. Le lecteur senior a réalisé une seconde interprétation du protocole 2 pour l'étude de la reproductibilité intra-

observateur. Un délai minimum de six semaines a été respecté entre chaque session de lecture.

Les relecteurs, au moyen d'une fiche standardisée Excel© (Microsoft) annotaient pour chaque examen leur évaluation du LCA en les classant en rupture complète, rupture partielle (en précisant le ou les faisceaux atteints) ou LCA normal. Pour cela, ils pouvaient s'aider de l'ensemble des séquences du protocole concerné et de tout signe direct ou indirect de rupture.

Ils décrivaient le niveau de confiance diagnostique quant à leur évaluation: élevé, moyen ou faible.

Enfin, ils précisaient le degré de visualisation de la structure bifasciculaire du LCA selon quatre stades : visibilité des 2 faisceaux sur toute la longueur du LCA, sur plus de 50% de la longueur, sur moins de 50% de la longueur, structure bifasciculaire non visible.

Les résultats de l'arthroscopie, pratiquée en monocentrique par 9 chirurgiens orthopédiques différents, ont été classés à la lecture du compte-rendu d'arthroscopie en trois groupes : rupture complète du LCA, rupture partielle du LCA, LCA normal.

3.3.4 Analyse statistique

Les statistiques ont été réalisées avec le logiciel MedCalc© version 8.1 pour Windows (Medcalc, Mariakerke, Belgique).
Les interprétations IRM ont été confrontées aux données de l'arthroscopie pour établir les sensibilités, spécificités, VPN, VPP, indices de Youden et coefficients Q de Yule pour chaque lecteur et pour chaque protocole. Des courbes ROC ont été établies et les aires sous la courbe ROC comparées selon la méthode de Delong[78].
L'étude des reproductibilités inter-observateurs et intra-observateur a été réalisée à l'aide de coefficients de Kappa (k). Les valeurs de k étaient interprétées en mauvaise (k =0,0-0,20), médiocre (k=0,21-0,40), modérée (k=0,41-0,60), bonne (k=0,61-0,80) ou excellente reproductibilité (k=0,81-1,0).

La visibilité de la structure bifasciculaire a été étudiée sur la population totale et sur deux sous-groupes formés en fonction des résultats de l'arthroscopie : un groupe correspondant aux LCA non rompus et un groupe pour les LCA rompus comprenant les ruptures partielles et complètes. La distinction des deux faisceaux peut se faire si le ligament est normal mais également dans un certain nombre de ruptures où le ligament reste à peu près en place. Nous avons donc formé deux sous-groupes afin d'étudier séparément ces deux cas de figures.

La recherche d'une différence entre les protocoles 1 et 2 pour la visibilité de la structure bifasciculaire du LCA a fait l'objet d'un test de khi2. Les reproductibilités inter-observateurs et intra-observateur pour la classification de visibilité en quatre stades ont été étudiées par le calcul de coefficients Kappa.

Les différences de niveau de confiance diagnostique entre les protocoles 1 et 2 ont été étudiées par un test de khi2. Les reproductibilités inter-observateurs et intra-observateur pour cette classification en trois niveaux de confiance ont été étudiées par le calcul de coefficient Kappa.

Enfin, nous avons étudié pour chacun des deux sous-groupes, « LCA non rompus » et « LCA rompus », la relation statistique entre visibilité des faisceaux et niveau de confiance diagnostique par un test de khi2.

3.2 Résultats

3.2.1 Evaluation du statut du LCA

L'arthroscopie a trouvé 41 (55,2%) ruptures complètes de LCA, 3 (4,5%) ruptures partielles et 23 (40,3%) LCA normaux. Pour l'étude statistique, les ruptures partielles et complètes ont été combinées. Les nombres de vrais positifs, faux positifs, vrais négatifs et faux négatifs sont indiqués dans le Tableau 2.
6 cas étaient des faux négatifs pour les deux lecteurs et ce quel que soit le protocole utilisé.

Dans 11 cas (16%), le protocole 2 améliorait la performance diagnostique pour au moins un des deux lecteurs en redressant un faux négatif ou un faux positif :

- 2 faux négatifs étaient redressés pour les deux lecteurs.
- 1 faux positif était redressé pour les deux lecteurs.
- 5 faux négatifs étaient redressés uniquement pour le lecteur 1
- 3 faux positifs étaient redressés uniquement pour le lecteur 2

Il y a un cas où le protocole 2 altérait la performance diagnostique pour le lecteur 2. Dans ce cas, un vrai positif dans le protocole 1 correspondait à un faux négatif dans le protocole 2.

		VP	FN	VN	FP
Lecteur 1	Protocole 1	29	15	22	1
	Protocole 2	36	8	21	2
Lecteur 2	Protocole 1	35	9	18	5
	Protocole 2	36	8	22	1

Tableau 2. Résultats de l'évaluation du LCA. VP : vrais positifs; FN : Faux négatifs; VN : Vrais négatifs; FP : Faux positifs.

Les sensibilités, spécificités, VPP, VPN, indice de Youden et coefficient Q de Yule des protocoles 1 et 2 sont indiqués dans le Tableau 3. Les sensibilités étaient supérieures avec le protocole 2 : 81,82%/81,82% versus 65,91%/79,55%. La spécificité diminuait pour le lecteur 1 avec le protocole 2 (91,3% versus 95,67%) alors qu'elle augmentait pour le lecteur 2 (95,65% versus 78,26%). Les indices de Youden et de Yule étaient supérieurs avec le protocole 2 pour les deux lecteurs.

Les courbes ROC sont présentées sur la Figure 26. L'aire sous la courbe pour le diagnostic de rupture du LCA était supérieure pour le protocole 2 chez les deux lecteurs. La différence était statistiquement significative pour le lecteur 2 (p=0,0289), non significative pour le lecteur 1 (p = 0,2218), selon la méthode de De Long *et al*.

	Lecteur 1		Lecteur 2	
	Protocole 1	Protocole 2	Protocole 1	Protocole 2
Sensibilité	65.91	81.82	79.55	81.82
Spécificité	95.67	91.3	78.26	95.65
VPP	96.67	94.74	87.5	97.3
VPN	59.46	72.41	66.67	73.33
Indice de Youden	0,62	0.73	0.58	0.77
Coefficient Q de Yule	0,95	0.96	0.87	0.98

Tableau 3. Performances diagnostiques pour l'évaluation du statut du LCA.

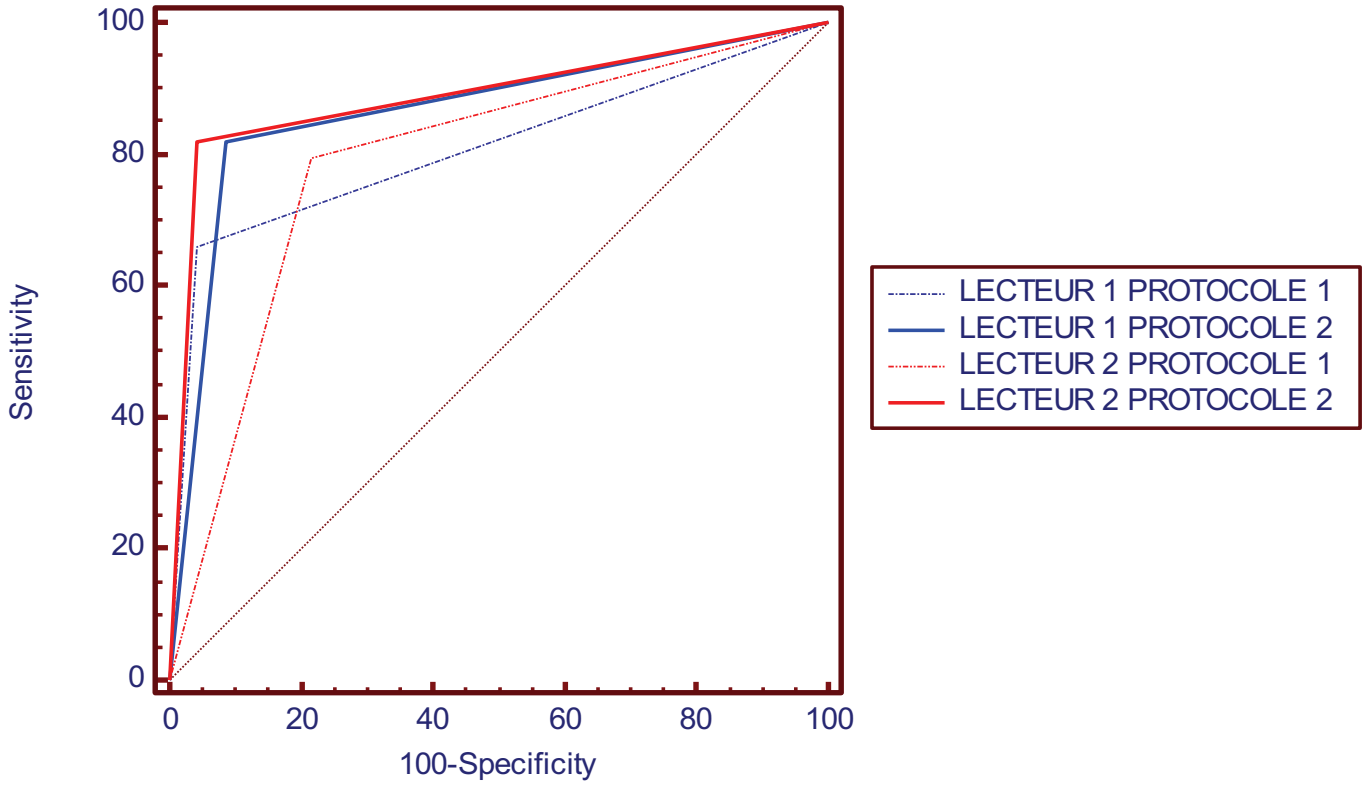


Fig.26. Courbes ROC pour le diagnostic de rupture du LCA pour chaque lecteur et chaque protocole.

Les corrélations inter-observateurs évaluées par le coefficient de Kappa sont présentées dans le Tableau 4. La corrélation inter-observateurs était bonne pour le protocole 1 (k=0,707) et excellente pour le protocole 2 (k=0,849). La reproductibilité intra-observateur du protocole 2, évaluée pour le lecteur senior, était excellente (k=0,88).

	Inter-observateurs protocole 1	**Inter-observateurs protocole 2**	**Intra-observateur protocole 2**
Kappa	0,707 (0,547 à 0,867)	0,849 (0,721 à 0,976)	0,88 (0,767 à 0,993)

Tableau 4. Valeurs de kappa pour la reproductibilité de l'évaluation du LCA.

3.2.2 Evaluation de la visibilité de la structure bifasciculaire

Les données concernant la visibilité des deux faisceaux du LCA sont indiquées au Tableau 5. Pour les deux lecteurs, les deux faisceaux du LCA étaient plus souvent vus avec le protocole 2 (64,2% pour le lecteur 1 et 74,6% pour le lecteur 2) qu'avec le protocole 1 (51,2% pour le lecteur 1 et 43,3% pour le lecteur 2). Avec le protocole 1, la structure bifasciculaire du LCA était « complètement vue, » ou « vue sur plus de 50% de sa longueur » pour 22,4% des patients chez le lecteur 1 et 19,4% chez le lecteur 2. Avec le protocole 2, les valeurs correspondantes étaient de 49,3% pour le lecteur 1 et 47,7% pour le lecteur 2.

La répartition en quatre classes était statistiquement différente entre les protocoles 1 et 2, et ce pour les deux lecteurs ($p < 0,001$). La répartition en deux classes (si l'on combine les « non vus » et « vus sur moins de 50% » d'une part et les « vus sur plus de 50% » et « vus sur toute la longueur » d'autre part) était aussi significativement différente entre les deux protocoles ($p<0,001$).

		Population totale. Visibilité des deux faisceaux.			
		Non vu	Vu sur moins de 50%	Vu sur plus de 50%	Vu sur toute la longueur
Lecteur 1	Protocole 1	30 (44,8%)	22 (32,8%)	9 (13,4%)	6 (9%)
	Protocole 2	24 (35,8%)	10 (14,9%)	4 (6%)	29 (43,3%)
Lecteur 2	Protocole 1	38 (56,7%)	16 (23,9%)	13 (19,4%)	0 (0%)
	Protocole 2	17 (25,4%)	18 (26,9%)	9 (13,4%)	23 (34,3%)

Tableau 5. Répartition en quatre classes de visibilité des deux faisceaux. Population totale.

Les résultats pour le sous-groupe de LCA non rompus sont résumés dans le Tableau 6. Dans ce sous-groupe de 23 cas, avec le protocole 2, la structure bifasciculaire était visible pour 91,2 % des patients pour le lecteur 1 et 95,7% pour le lecteur 2. La structure bifasciculaire était vue sur toute la longueur du ligament dans 73,9 % des cas pour les deux lecteurs.

		LCA non rompus. Visibilité des deux faisceaux.			
		Non vu	Vu sur moins de 50%	Vu sur plus de 50%	Vu sur toute la longueur
Lecteur 1	Protocole 1	2 (8,7%)	11 (47,8%)	5 (21,7%)	5 (21,7%)
	Protocole 2	2 (8,7%)	3 (13%)	1 (4,3%)	17 (73,9%)
Lecteur 2	Protocole 1	8 (34,8%)	6 (26,1%)	9 (39,1%)	0 (0%)
	Protocole 2	1 (4,3%)	1(4,3%)	4(17,4%)	17 (73,9%)

Tableau 6. Répartition en quatre classes de visibilité des deux faisceaux. Sous-groupe des LCA non rompus en arthroscopie.

Les résultats pour le sous-groupe des LCA rompus sont résumés dans le Tableau 7. Dans ce sous-groupe de 44 cas, la structure bifasciculaire du LCA était « non vue » ou « vue sur moins de 50% de la longueur », dans 88,6%/90,0% des cas pour le protocole 1 et

dans 65,9%/75% des cas pour le protocole 2, respectivement pour les lecteurs 1 et 2. Le LCA était vu sur toute sa longueur dans 2,3%/0% des cas avec le protocole 1 et 27,3%/13,6 % des cas avec le protocole 2.

		LCA rompus. Visibilité des deux faisceaux.			
		Non vu	Vu sur moins de 50%	Vu sur plus de 50%	Vu sur toute la longueur
Lecteur 1	Protocole 1	28 (63,6%)	11 (25%)	4 (9,1%)	1 (2, 3%)
	Protocole 2	22 (50%)	7 (15,9%)	3 (6,8%)	12 (27, 3%)
Lecteur 2	Protocole 1	30 (68,2%)	10 (22,7%)	4 (9,1%)	0 (0%)
	Protocole 2	16 (36,4%)	17 (38,6%)	5 (11,4%)	6 (13,6%)

Tableau 7. Répartition en quatre classes de visibilité des deux faisceaux. Sous-groupe des LCA rompus en arthroscopie.

La reproductibilité inter-observateurs de la classification de la visibilité des deux faisceaux (Tableau 8), évaluée par le calcul des coefficients de Kappa, était modérée pour le protocole 1 (k=0,421), bonne pour le protocole 2 (k=0,640). La reproductibilité intra-observateur pour le protocole 2 (lecteur 1 senior) était bonne (k=0,711).

	Inter-observateurs protocole 1	**Inter-observateurs protocole 2**	**Intra-observateur protocole 2**
Kappa	0,421 (0,263 à 0,578)	0,640 (0,518 à 0,761)	0,711 (0,592 à 0,831)

Tableau 8. Reproductibilité de la classification en quatre classes de visibilité des deux faisceaux.

3.3.3 Etude du niveau de confiance diagnostique

Les données concernant le niveau de confiance diagnostique pour les protocoles 1 et 2 sont présentées dans le Tableau 9.

		Confiance diagnostique		
		Faible	**Moyenne**	**Elevée**
Lecteur 1	Protocole1	4 (6,0%)	16 (23,9%)	47 (70,1%)
	Protocole2	4 (6,0%)	13 (19,4%)	50 (74,6%)
Lecteur 2	Protocole1	16 (23,9%)	17 (25,4%)	34 (50,7%)
	Protocole2	0 (0,0%)	10 (14,9%)	57 (85,1%)

Tableau 9. Répartition en niveaux de confiance diagnostique pour chaque lecteur et chaque protocole.

Avec l'ajout de la séquence axiale oblique, le niveau de confiance diagnostique était élevé dans un plus grand nombre de cas. Ainsi, respectivement pour les lecteurs 1 et 2, il était élevé dans 74,6 et 85,1% des cas avec le protocole 2 contre 70,1 et 50,7% avec le protocole 1.

Les niveaux de confiance diagnostique étaient statistiquement différents entre les deux protocoles (p = 0,0248 pour le lecteur 1; p= 0,0166 pour le lecteur 2).

La reproductibilité intra-observateur pour le protocole 1 était médiocre (k=0,319) ; elle était mauvaise pour le protocole 2 (k=0,190). La reproductibilité intra-observateur pour le niveau de confiance diagnostique était médiocre (k=0,345).

3.3.4 Relation entre visibilité de la structure bifasciculaire et niveau de confiance diagnostique

Pour l'étude de la relation entre visibilité des faisceaux et niveau de confiance diagnostique pour le protocole 2, nous avons distingué deux sous-groupes en fonction des résultats de l'arthroscopie : un groupe correspondant aux LCA rompus (44 cas) et un groupe pour les LCA non rompus (23cas).
Les Tableaux 10 et 11 confrontent le niveau de confiance diagnostique à la visibilité des faisceaux pour le sous-groupe des LCA non rompus.
Pour le lecteur 1, dans 12 des 15 cas (80% des cas) où sa confiance diagnostique était élevée, les deux faisceaux étaient distincts sur toute leur longueur. Dans 3 des 8 cas où sa confiance diagnostique était faible ou moyenne, les deux faisceaux étaient « vus sur moins de 50% de la longueur » ou « non vus ».
Pour le lecteur 2, dans 15 des 19 cas (79% des cas) où sa confiance diagnostique était élevée, les deux faisceaux étaient distincts sur toute leur longueur. Dans aucun des 4 cas où sa confiance diagnostique était faible ou moyenne, les deux faisceaux étaient « vus sur moins de 50% de la longueur » ou « non vu ».

Pour le sous-groupe des LCA non rompus en arthroscopie, il existait un lien statistiquement significatif entre la classification de la visibilité des deux faisceaux du LCA et le niveau de confiance diagnostique pour le lecteur 1 ($p = 0,0492$) mais pas pour le lecteur 2 ($p = 0,2890$).

	Confiance diagnostique lecteur 1			
Visibilité des faisceaux	**Faible**	**Moyen**	**Elevé**	
Non vus	1	1	0	2 (8,7%)
Vus < 50%	0	1	2	3 (13,0%)
Vus > 50%	0	0	1	1 (4,3%)
Vus sur toute la longueur	0	5	12	17 (73,9%)
	1 (4,3%)	7 (30,4%)	15 (65,2%)	23

Tableau 10 : Lecteur 1. Tableau à double entrée confrontant confiance diagnostique et visibilité des deux faisceaux dans le sous-groupe des LCA non rompus en arthroscopie.

	Confiance diagnostique lecteur 2		
Visibilité des faisceaux	**Moyen**	**Elevé**	
Non vus	0	1	1 (4,3%)
Vus < 50%	0	1	1 (4,3%)
Vus > 50%	2	2	4 (17,4%)
Vus sur toute la longueur	2	15	17 (73,9%)
	4 (17,4%)	19 (82,6%)	23

Tableau 11 : Lecteur 2. Tableau à double entrée confrontant confiance diagnostique et visibilité des deux faisceaux dans le sous-groupe des LCA non rompus en arthroscopie.

Les Tableaux 12 et 13 confrontent le niveau de confiance diagnostique à la visibilité des faisceaux pour le sous-groupe des LCA rompus.

Pour le lecteur 1, dans 27 des 36 cas (75% des cas) où la confiance diagnostique était élevée, les deux faisceaux étaient « non vus » ou « vus sur moins de 50% de leur longueur ». Dans 6 des 8 cas où la confiance diagnostique était faible ou moyenne, les deux faisceaux étaient « vus sur plus de 50% de la longueur » ou « vus sur toute la longueur».

Pour le lecteur 2, dans 29 des 38 cas (76% des cas) où la confiance diagnostique était élevée, les deux faisceaux étaient « non vus » ou « vus sur moins de 50% de leur longueur ». Dans 2 des 6 cas où la confiance diagnostique était faible ou moyenne, les deux faisceaux étaient vus sur plus de 50% de la longueur du ligament.

Pour le sous-groupe des LCA rompus en arthroscopie, il existait un lien statistique ente le niveau de confiance diagnostique et la visibilité des faisceaux du LCA (p=0,0379 pour le lecteur 1, p=0,0495 pour le lecteur 2).

	Confiance diagnostique Lecteur 1			
Visibilité des faisceaux	**Faible**	**Moyen**	**Elevé**	
Non vus	0	0	22	22 (50,0%)
Vus < 50%	0	2	5	7 (15,9%)
Vus > 50%	0	1	2	3 (6,8%)
Vus sur toute la longueur	2	3	7	12 (27,3%)
	2 (4,5%)	6 (13,6%)	36 (81,8%)	44

Tableau 12 : Lecteur 1. Tableau à double entrée confrontant confiance diagnostique et visibilité des deux faisceaux dans le sous-groupe des LCA rompus en arthroscopie.

	Confiance diagnostique Lecteur 2		
Visibilité des faisceaux	**Moyen**	**Elevé**	
Non vus	0	16	16 (36,4%)
Vus < 50%	4	13	17 (38,6%)
Vus > 50%	2	3	5 (11,4%)
Vus sur toute la longueur	0	6	6 (13,6%)
	6	38	44
	(13,6%)	(86,4%)	

Tableau 13 : Lecteur 2. Tableau à double entrée confrontant confiance diagnostique et visibilité des deux faisceaux dans le sous-groupe des LCA rompus en arthroscopie.

3.4 Discussion

3.4.1 Analyse des résultats sur l'évaluation du LCA

Dans notre étude, nous avons montré que la séquence axiale oblique était utile dans 11 cas sur 67 (16%) permettant à l'un au moins des lecteurs d'améliorer son évaluation du statut du LCA.

Pour le lecteur senior, le protocole standard se montrait robuste en spécificité (Sp=95,67%) mais avec une sensibilité plutôt modérée (Se =65,91%). Ces valeurs sont comparables avec les données de la littérature chez des populations non sélectionnées issues de la pratique quotidienne[19,40]. L'ajout de la séquence axiale oblique permettait au lecteur senior d'accroître sa sensibilité, avec une spécificité restant élevée malgré une diminution par rapport au protocole standard. La qualité diagnostique de l'examen était accrue, avec des indices de Youden et coefficients Q de Yule augmentés.

Pour le lecteur senior, il y avait au total 7 cas pour lesquels la séquence permettait de redresser un FN en VP. Le gain en sensibilité s'explique par les qualités propres à la séquence axiale oblique : le plus petit champ de vue, les coupes plus fines, l'orientation perpendiculaire aux fibres du LCA diminue les effets de volume partiel. L'absence de saturation du signal de la graisse permise par la diminution du volume partiel restitue également de l'information. Toutes ces caractéristiques permettent une meilleure analyse du signal intra- et péri-ligamentaire (Fig. 27, 28, 29). La séquence axiale oblique apporte une meilleure appréhension du volume ligamentaire plan par plan et met plus facilement en évidence un amincissement cicatriciel du LCA (Fig. 30, 31).

L'aire sous la courbe ROC pour le lecteur senior n'était statistiquement pas améliorée avec l'ajout de la séquence axiale oblique, probablement en raison de la robustesse en spécificité déjà élevée du protocole standard pour ce lecteur mais surtout en raison d'un manque de puissance statistique liée à notre nombre de patients. Il existait cependant chez le lecteur senior une nette augmentation de la sensibilité de 65,91 à 81,82%

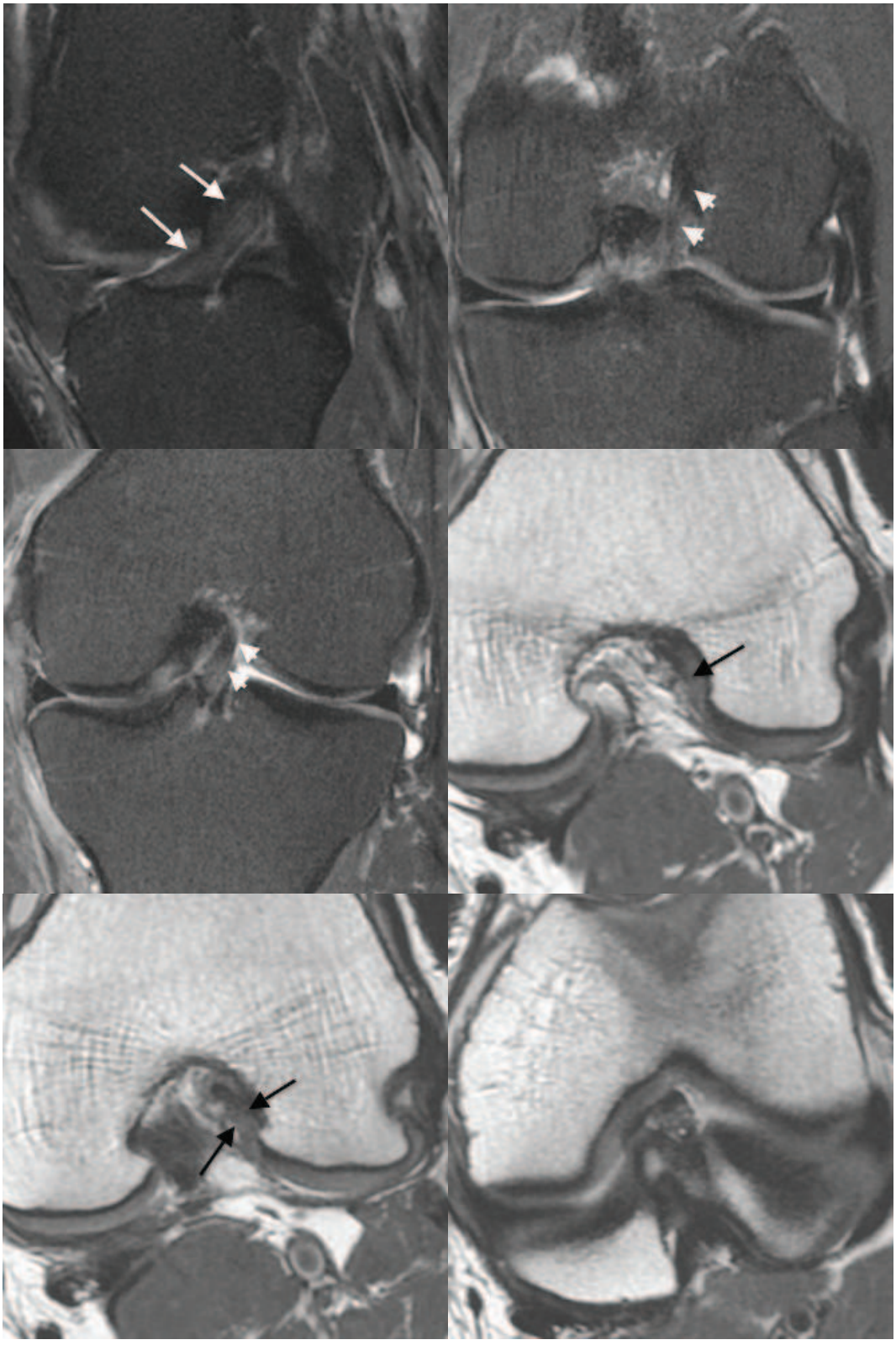


Fig.27. Patient n°1831, 44 ans, traumatisme du genou. IRM réalisée à J13. La séquence sagittale oblique dégageait mal le LCA (flèches blanches) qui semblait continu sur la séquence coronale oblique (têtes de flèches blanches). La séquence axiale oblique permettait de bien mettre en évidence les anomalies de signal du LCA (flèches noires) et affirmait l'atteinte traumatique au moins partielle du LCA, confirmée par l'arthroscopie.

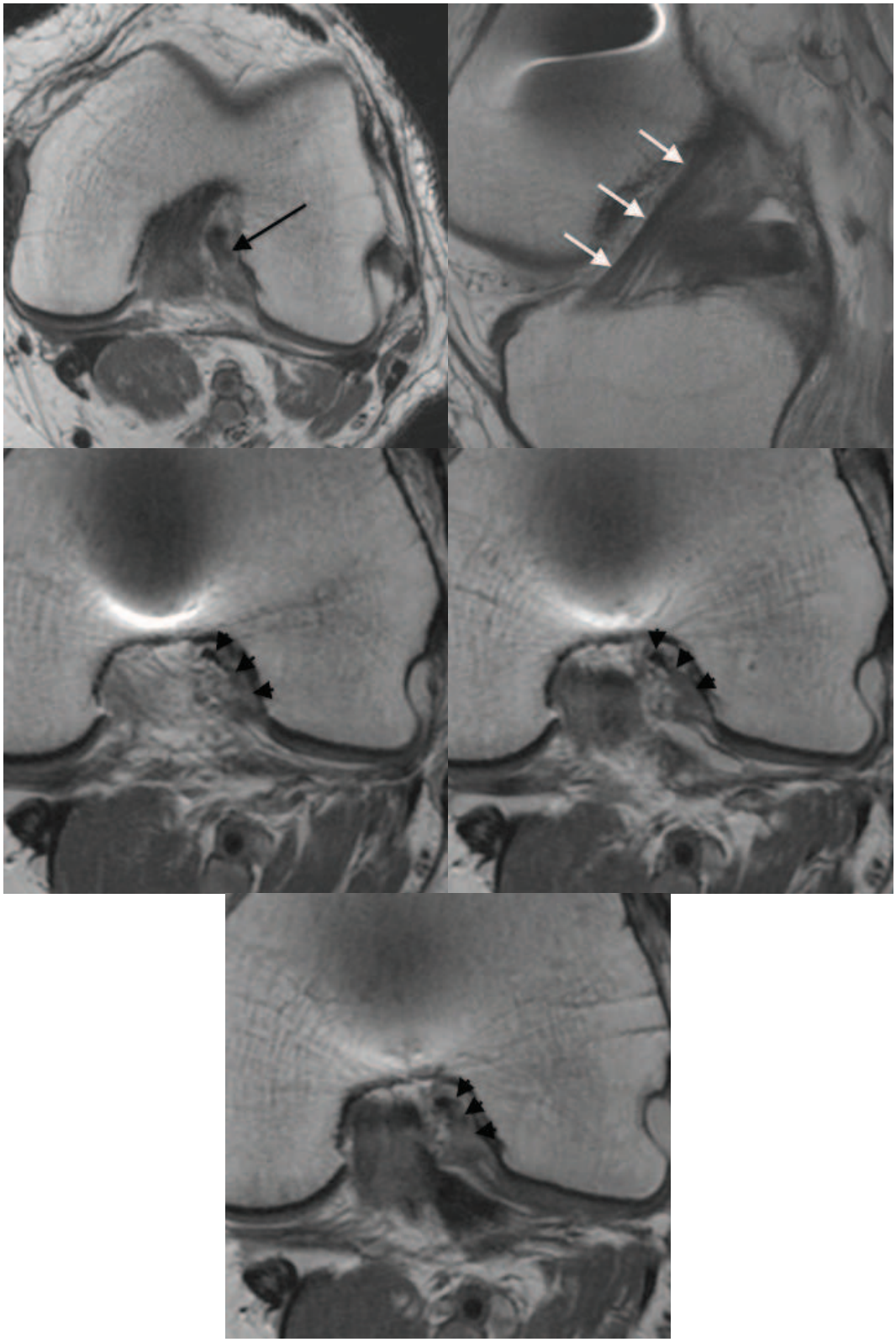


Fig.28. Patient n°1843, 42 ans, polytraumatisé. Sur la séquence axiale orthogonale, anomalie de signal intra-tendineuse visible sur une seule coupe (flèche noire). Sur la séquence sagittale oblique, le LCA est bien visible sur toute sa longueur et d'orientation normale (flèches blanches). Sur l'axiale oblique, visibilité sur plus de 3 coupes successives, d'anomalies de l'insertion proximale du LCA (hypersignal ligamentaire et amincissement). Pour un lecteur, la séquence a permis de redresser un faux négatif.

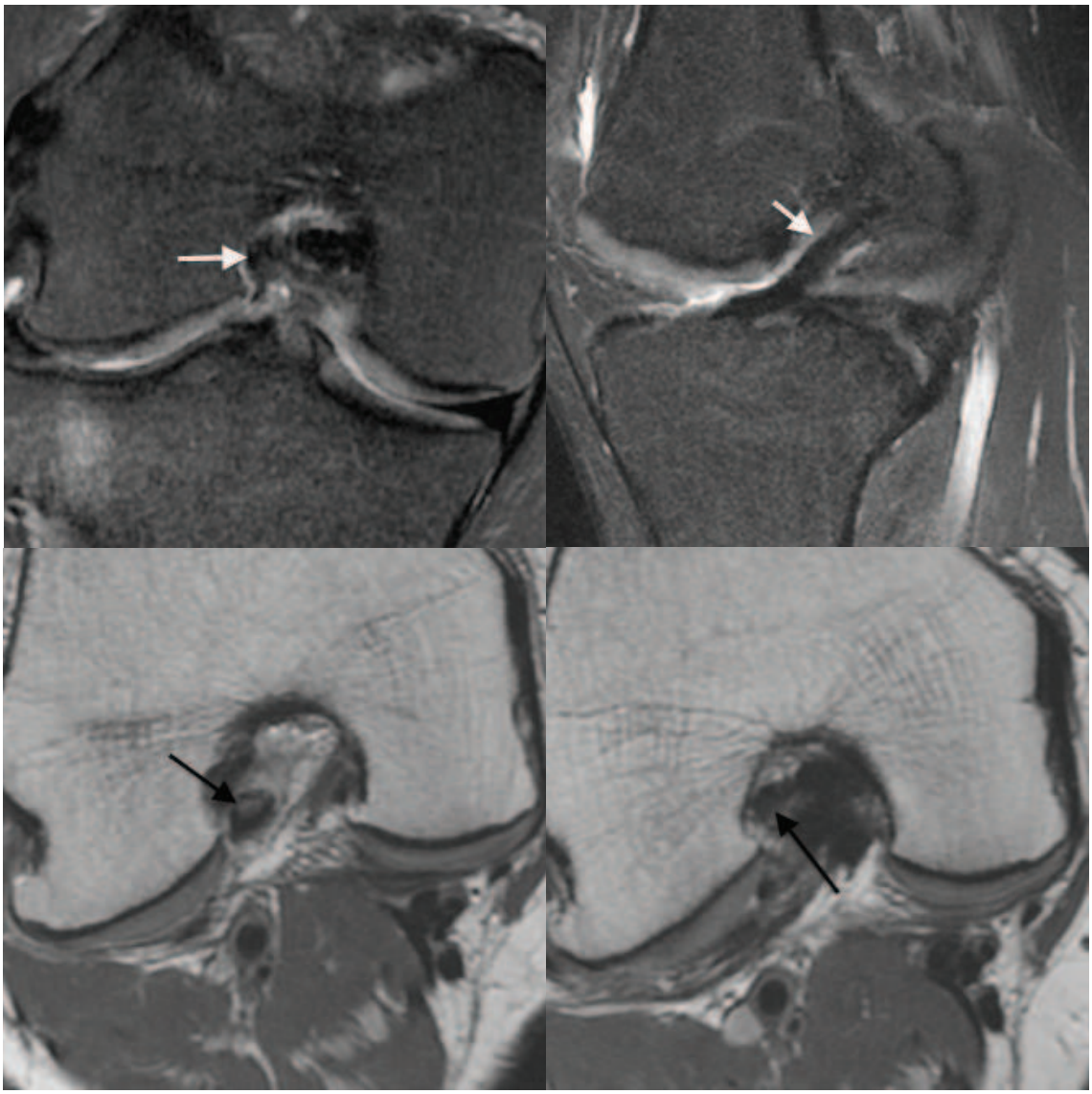


Fig. 29. Patiente n°1819. 40 ans, traumatisme ancien du genou avec instabilité. L'arthroscopie a mis en évidence une rupture ancienne du LCA cicatrisée en nourrice.
Sur les séquences coronale et sagittale DP fat sat, aspect discrètement détendu du LCA mais avec un signal restant bas (flèches blanches). Sur la séquence axiale oblique, hypersignal intra-ligamentaire anormal (flèches noires). La séquence a permis l'augmentation de la confiance diagnostique chez un lecteur et le redressement d'un faux négatif chez l'autre lecteur, avec un niveau de confiance élevé.



Fig.30. Patient n°1741, 22ans, sans traumatisme évident retrouvé à l'interrogatoire, qui consulte pour des gonalgies altérant la fonction du genou. L'arthroscopie a mis en évidence une lésion du faisceau postéro-latéral.
Sur les séquences coronale et sagittale oblique, l'orientation du LCA apparaît normale, sans discontinuité de fibre visible (flèches blanches).
Sur la séquence axiale oblique, hypersignal anormal, désorganisation et amincissement du faisceau postéro-latéral (flèches noires).

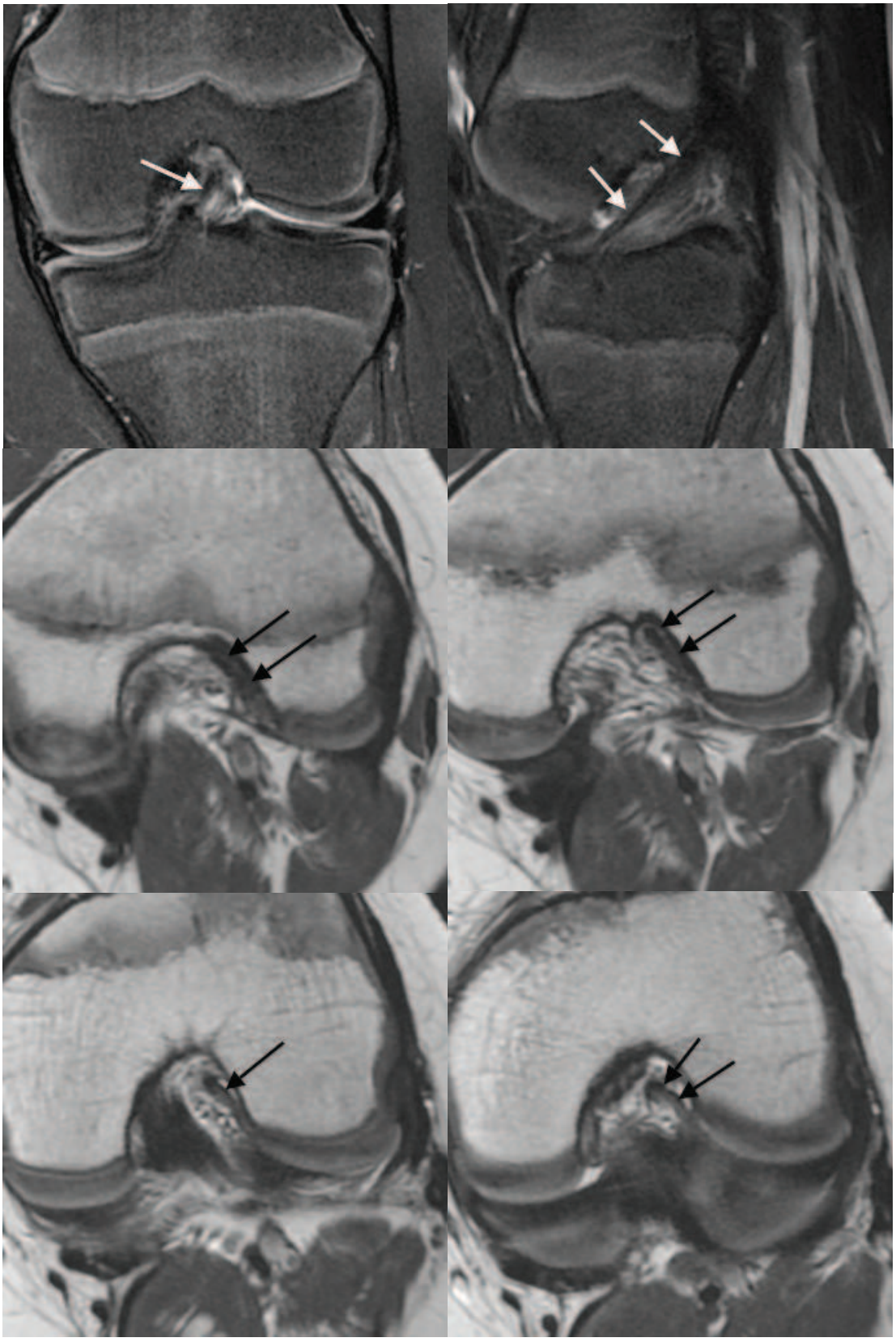


Fig.31. Patient n° 1806. Jeune patient de 11 ans, traumatisme ancien (IRM à 220 jours). Lésion complète du LCA, cicatrisée, d'allure continue et normalement orientée sur les séquences classiques (flèches blanches), mieux visible sur la séquence axiale oblique, par une anomalie de signal intra-tendineuse et un amincissement (flèches noires). Le diagnostic de rupture du LCA, surtout ancienne, est difficile chez l'enfant.

Pour le lecteur junior, le protocole standard se montrait plus sensible que pour le lecteur senior (Se =79,55) mais avec une spécificité inférieure (Sp =78,26%). Le lecteur junior, avec le protocole standard, disposait d'un test diagnostic moins performant que lecteur senior d'après l'indice de Youden et le coefficient Q de Yule. Avec l'ajout de la séquence axiale oblique, le lecteur junior gagnait à la fois en sensibilité et en spécificité, égalant le lecteur senior en sensibilité et le dépassant en spécificité. La différence de spécificité résultait d'un seul cas. Comme le lecteur senior, le lecteur junior gagnait en sensibilité mais il gagnait aussi en spécificité, en supprimant un total de 4 faux positifs. Ces faux positifs du protocole standard étaient dus à une mauvaise interprétation d'hypersignaux intra- ou péri-ligamentaires (Fig. 32 et 33) ou à une orientation douteuse du LCA sur les coupes sagittales obliques (Fig. 34).
L'aire sous la courbe ROC pour le lecteur junior se modifiait significativement entre les deux protocoles, d'une part en raison du manque relatif de robustesse en spécificité du lecteur junior avec le protocole standard et d'autre part en raison de ses performances rejoignant celles du lecteur senior avec l'ajout de la séquence axiale oblique.

Le principal apport de la séquence axiale oblique était donc différent pour les deux lecteurs : gain en sensibilité pour le lecteur senior, gain en spécificité pour le lecteur junior. Ceci confirme que l'expérience est un des facteurs essentiels du diagnostic et de la performance diagnostique[79,80].

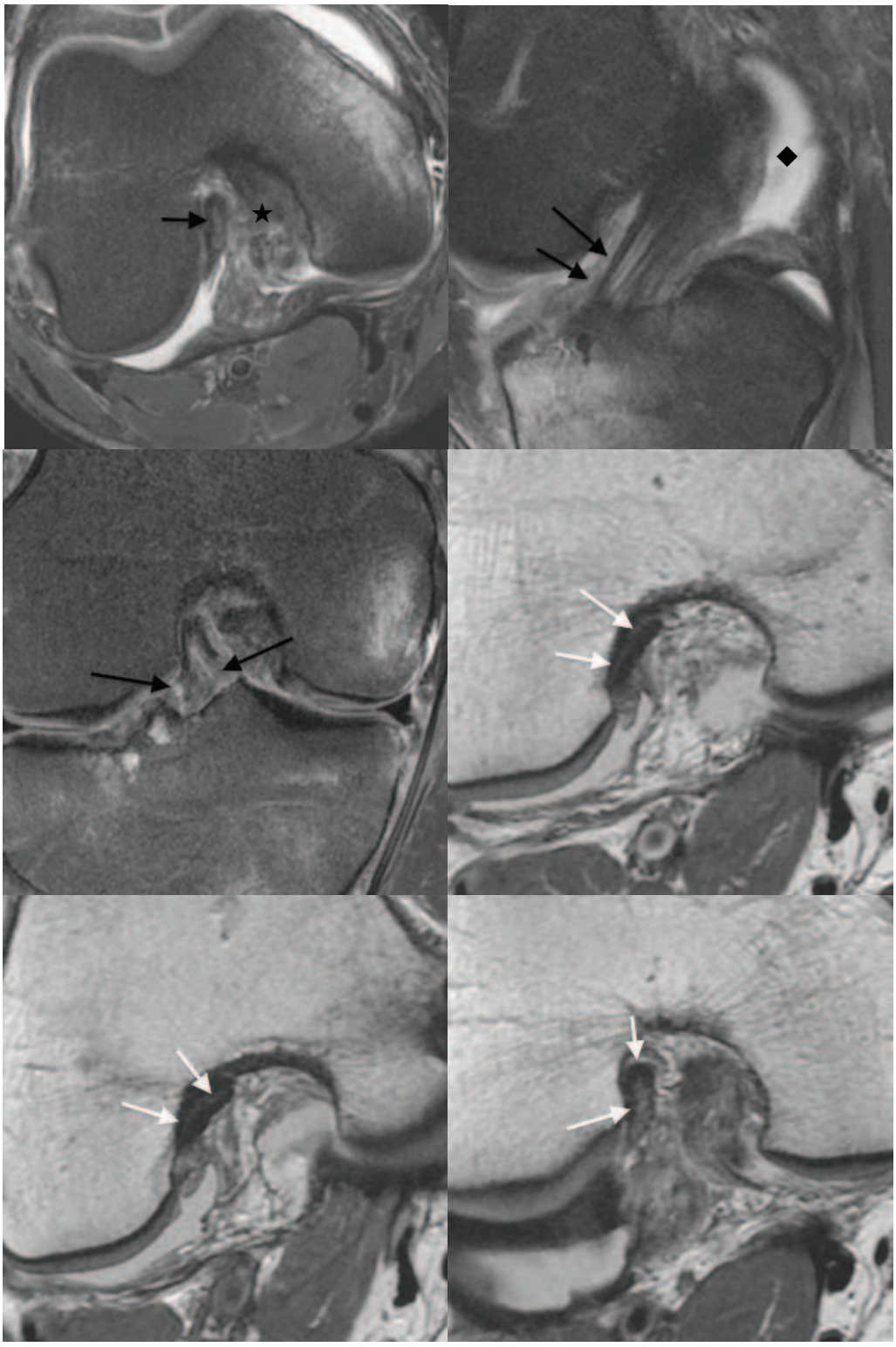


Fig.32. Patient n°1757, 27 ans, traumatisme du genou exploré par IRM à J14.
Sur les séquences axiale stricte et coronale oblique, hypersignaux plutôt distaux (flèches noires) douteux pour un des lecteurs. Notons la rupture du LCP (étoile) et l'épanchement intra-articulaire (losange). Sur la séquence axiale oblique, le LCA est parfaitement anatomique (flèches blanches). L'arthroscopie a confirmé la normalité du LCA.

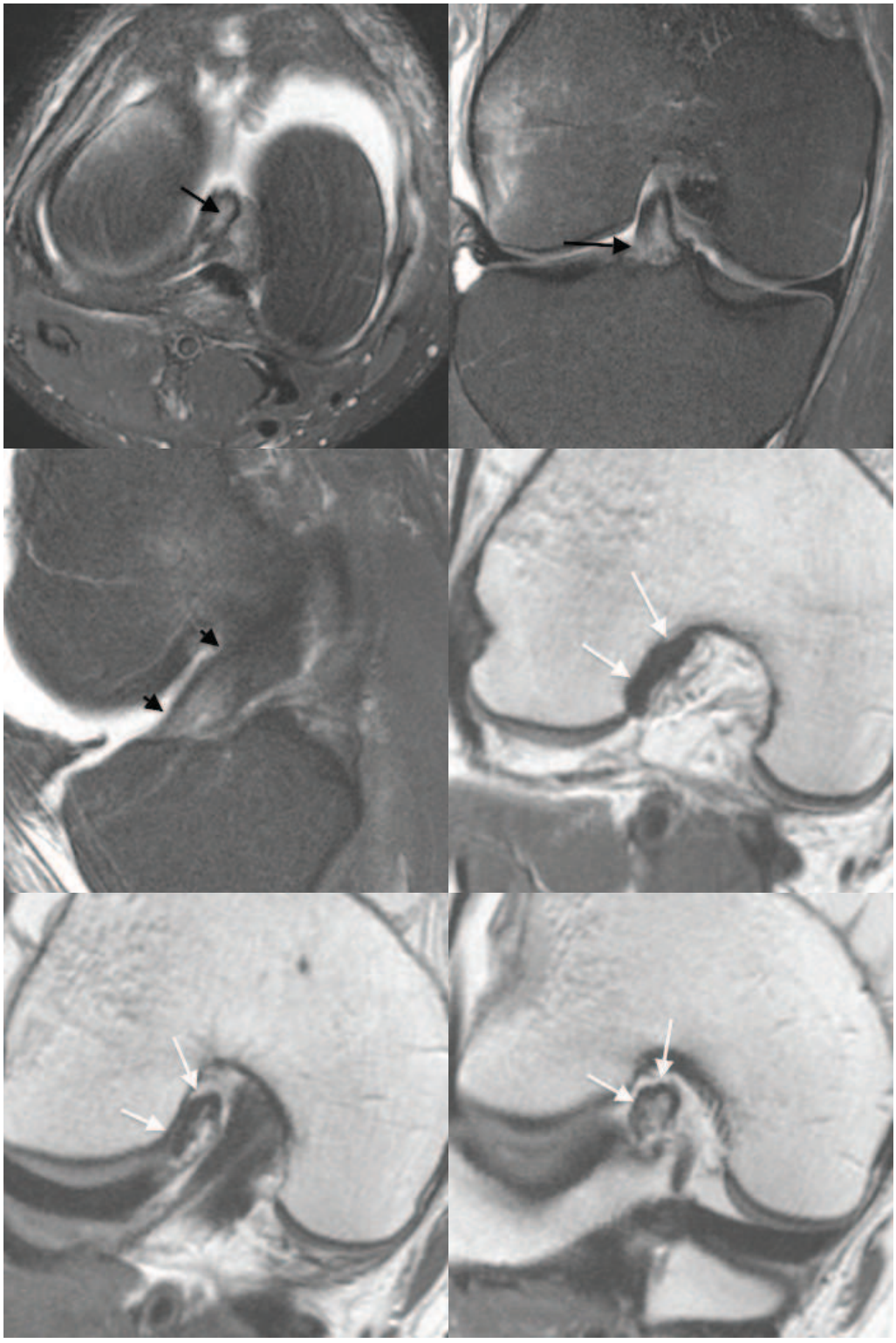


Fig.33. Patient 1830, 32 ans, traumatisme du genou exploré en IRM à J7.
Sur les séquences axiale strict et coronale, hypersignal ligamentaire douteux distal (flèches noires) et sur la séquence sagittale oblique, aspect discrètement ondulé du LCA (petites flèches noires). Sur la séquence axiale oblique, LCA d'aspect parfaitement normal dans ses portions proximale, intermédiaire et distale (flèches blanches). Statut normal confirmé par arthroscopie.

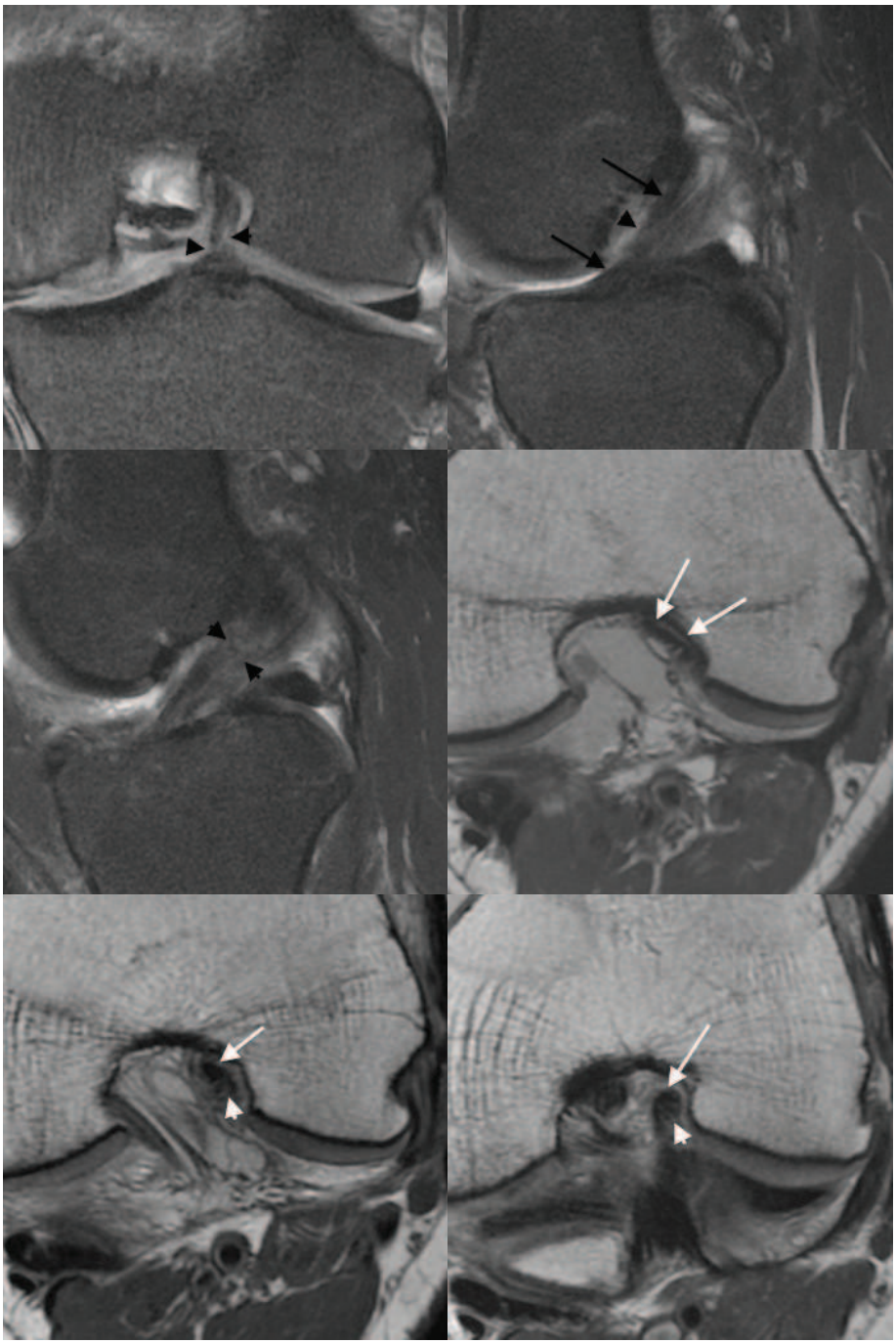


Fig.34. Patient n°1849, 35 ans. L'IRM avait été demandée pour exploration d'un syndrome méniscal clinique. Avec le protocole standard, pour les deux lecteurs, la confiance diagnostique était faible. L'un penchait plutôt pour la rupture, l'autre pour l'intégrité du LCA. La séquence sagittale oblique dégageant mal le LCA sur une seule coupe, son orientation était d'analyse difficile (flèches noires). Le signal intra -et péri-ligamentaire était plus élevé que la normale sur les trois séquences du protocole classique (têtes de flèches noires) mais un épanchement intra-articulaire était à prendre en compte pour l'interprétation de ces anomalies de signal.
La séquence axiale oblique montrait un LCA anatomique dans ses différentes portions (flèches blanches), avec un signal plus élevé habituel dans les portions intermédiaire et distale du faisceau postéro-latéral (têtes de flèches blanches). Ceci a permis, avec une confiance élevée pour les deux lecteurs, d'orienter vers un LCA normal, ce qui a été confirmé par l'arthroscopie.

Les six cas de faux négatifs IRM (quel que soit le lecteur ou le protocole utilisé) ont été analysés *a posteriori* et de manière collégiale par les deux lecteurs. Dans ces six cas, la moyenne du délai entre la réalisation de l'IRM et l'arthroscopie était de 47 jours contre 84 jours dans notre population totale. Les tableaux cliniques étaient de type méniscal sans traumatisme évident dans deux cas et de nature traumatique dans 4 cas. La moyenne de délai entre le traumatisme et l'IRM dans ces quatre cas était de 124 jours contre 20 jours dans notre population totale.

Rétrospectivement, dans deux cas, une discrète anomalie de signal péri-ligamentaire pouvait faire douter sur le statut du LCA (Fig. 35, 36). Dans les quatre autres cas, l'IRM ne présentait aucun signe de rupture.

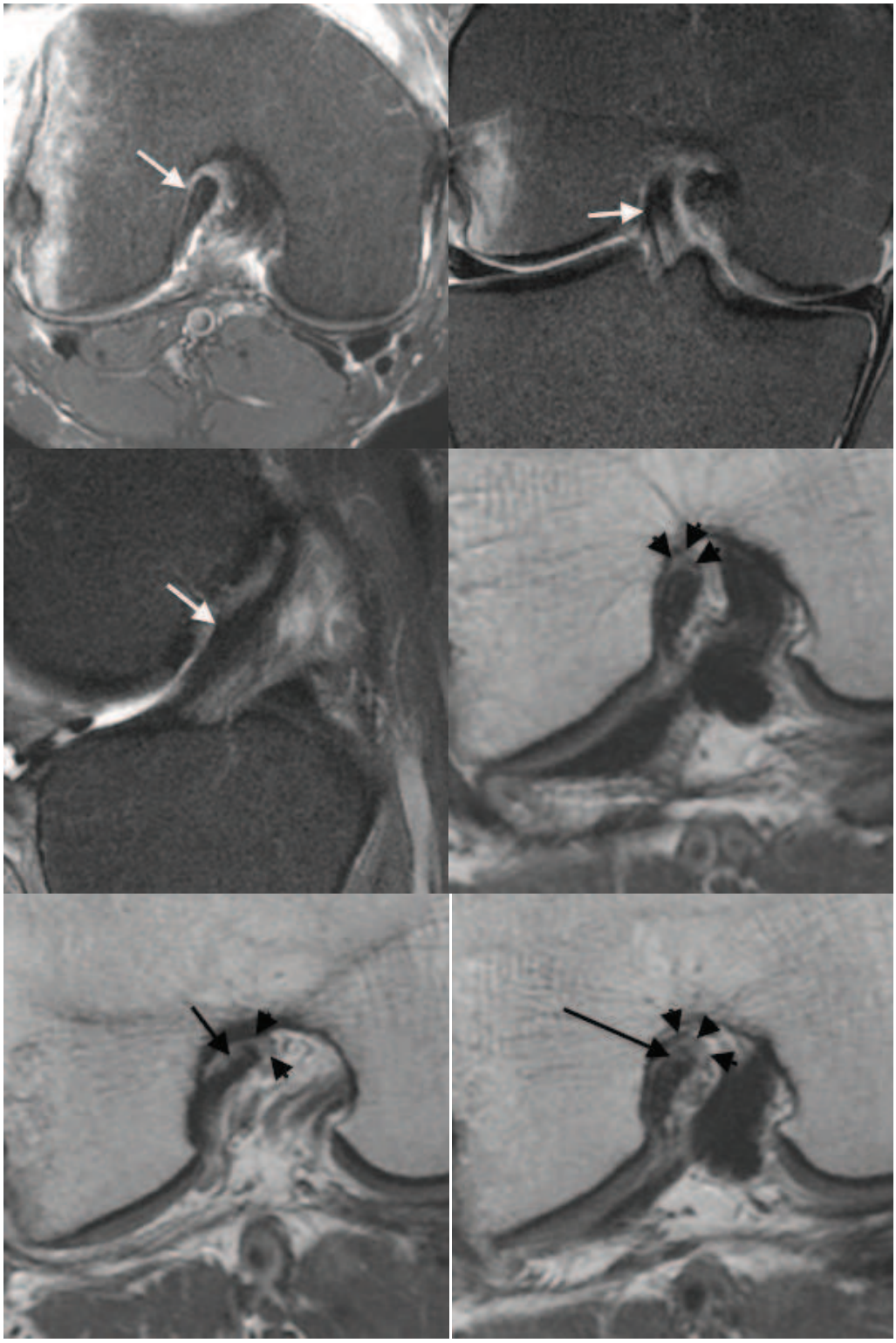


Fig.35. Patient n°1839, 33 ans, ayant eu une IRM à 3 semaines d'un traumatisme. Sur les séquences classiques, le LCA était de signal normal, normalement orienté et tendu (flèches blanches). Sur la séquence axiale oblique, étaient rétrospectivement visibles de discrets hypersignaux de la portion proximale du faisceau antéro-médial (flèches noires) et de discrets hyposignaux annulaires du tissu péri-ligamentaires (têtes de flèches noires).

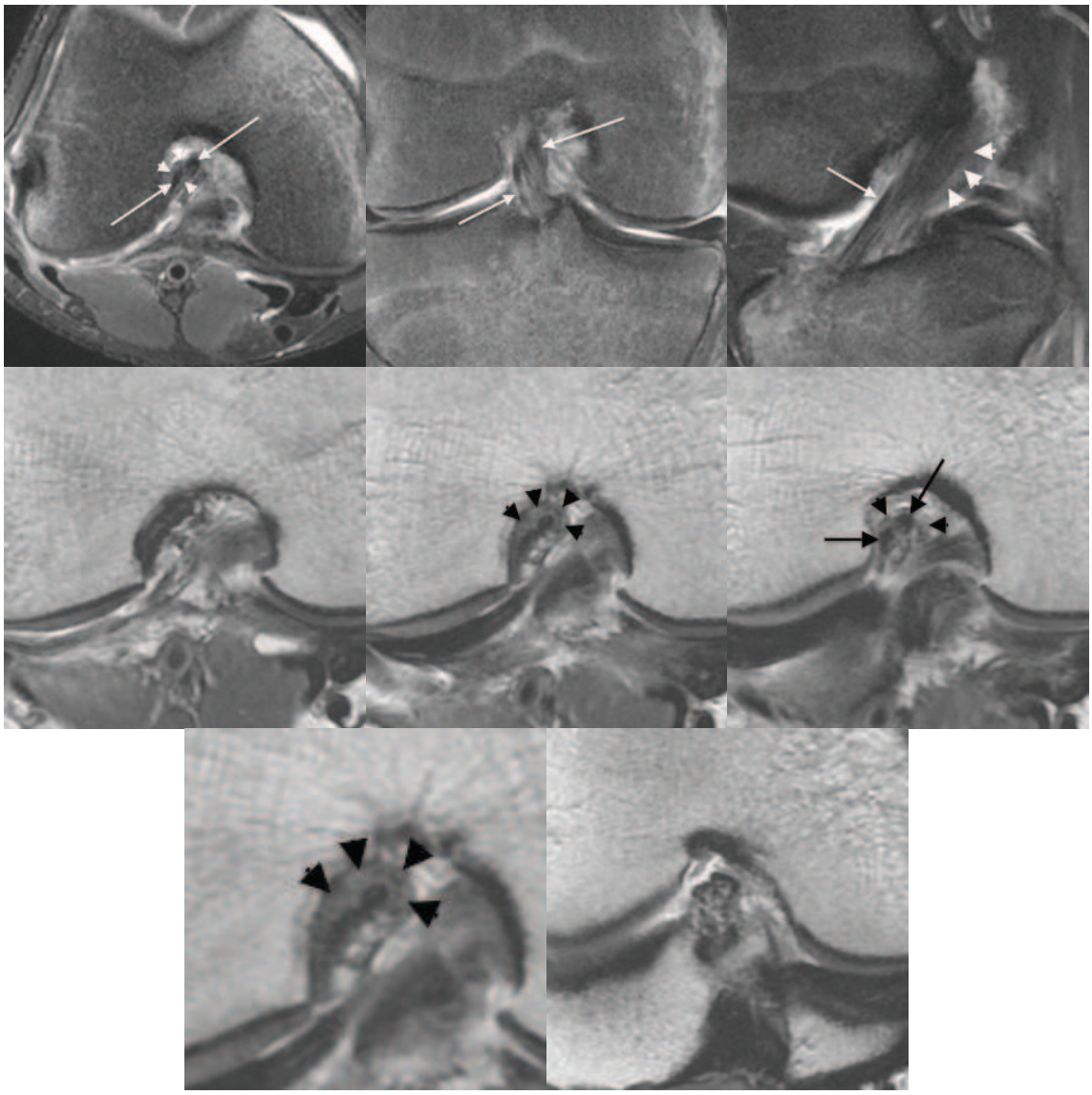


Fig.36. Patient n°1772, 21 ans, traumatisme récent du genou, IRM à J21.
Sur les séquences du protocole classique, on visualisait deux faisceaux du LCA d'allure continue, d'orientation et de signal normaux (flèches blanches). Discrète anomalie de signal autour du FPL visible sur les séquences axiale stricte et sagittale (têtes de flèches blanches). Sur la séquence axiale oblique, on retrouvait des hyposignaux annulaires autour du FPL mais aussi autour du FAM (têtes de flèches noires) sur plusieurs coupes consécutives. Les faisceaux apparaissaient également amincis (flèches noires). Rétrospectivement, ces signes pouvaient faire évoquer le diagnostic de rupture du LCA.

Une des caractéristiques de notre population était sa grande hétérogénéité : que ce soit en âge, en indications de l'IRM, dans les délais entre l'éventuel traumatisme et la réalisation de l'IRM ou dans les délais entre la réalisation de l'IRM et l'arthroscopie. Le délai moyen entre l'éventuel traumatisme et la réalisation de l'IRM était de 20 jours, ce qui est comparable à la plupart des études publiées[37,38] mais s'échelonnant de 3 à 262 jours. Le délai moyen entre la réalisation de l'IRM et l'arthroscopie était de 84 jours dans notre étude, supérieur à celui observé dans la plupart des études[38]. L'hétérogénéité de la population rendait probablement l'analyse des données IRM plus difficile, d'autant que les lecteurs étaient à l'aveugle de tout renseignement clinique.

A notre connaissance, notre étude est la seule à ce jour à avoir étudié la séquence axiale oblique avec des lecteurs indépendants et avec des mesures des reproductibilités inter-observateurs et intra-observateur. Une seule autre étude, récente, a étudié l'apport de la séquence axiale oblique pour le diagnostic des ruptures du LCA[81]. Cette étude, portant sur 61 patients, a été réalisée sur IRM 3T, et a également montré une amélioration de la performance diagnostique entre un protocole standard et un protocole incluant la séquence axiale oblique. Les valeurs de sensibilité et spécificité pour le diagnostic de rupture du LCA étaient respectivement de 33% et 87% avec le protocole standard, et de 87% et 87% avec le protocole incluant la séquence axiale oblique. Le chiffre de sensibilité pour le protocole standard apparaît très bas dans cette étude par rapport aux données habituelles de la littérature. Le protocole standard utilisé n'incluait pas de séquence sagittale ou coronale oblique mais uniquement des séquences orthogonales strictes, ce qui est désormais peu usité en pratique.

3.4.2 Analyse des résultats sur la visibilité de la structure bifasciculaire

Nous avons montré que la visibilité de la structure bifasciculaire était améliorée avec l'ajout de la séquence axiale oblique, quel que soit le statut arthroscopique du LCA.

Dans le cas d'un LCA normal étudié avec l'ajout de la séquence axiale oblique, la structure bifasciculaire était vue au moins en partie dans plus de 90% des cas et

visualisée sur toute sa longueur dans plus de 73,9% des cas. Nous avons retrouvé des chiffres comparables à ceux obtenus par Adriaensen *et al* sur une IRM 3T avec des séquences classiques. Dans cette étude, les deux faisceaux étaient discernables dans 94% des cas et la meilleure séquence pour distinguer les deux faisceaux était la séquence axiale[4]. Montoy *et al*, sur 100 genoux explorés à 1,5T avec des séquences axiale et coronale, ont montré une visibilité des 2 faisceaux dans 90% des cas avec la séquence axiale, sur 2,7 coupes en moyenne[82]. Kaya *et al* avaient des résultats bien inférieurs, sur 93 patients, en IRM 1,5T avec des séquences classiques : les deux faisceaux n'étaient visibles que dans 42% des cas, principalement sur les séquences coronales et axiales[14]. Starman *et al*, sur IRM 0,2T et avec des séquences classiques, ont également montré qu'il était difficile de distinguer de manière fiable les deux faisceaux du LCA, en insistant particulièrement sur la moins bonne visibilité du FPL et le manque de reproductibilité concernant la visibilité du FPL. Ils concluaient sur la nécessité de plus haut champ et de séquences obliques pour mieux distinguer les deux faisceaux[83].
Enfin, Ng *et al* visualisaient la structure bifasciculaire dans 100% des cas, sur 60 genoux normaux, en IRM 3T avec la séquence axiale oblique[57].
Il semblerait donc que la visibilité des deux faisceaux du LCA normal soit meilleure :

- à haut champ plutôt qu'à bas champ
- sur des séquences axiales plutôt que coronales ou sagittales
- sur la séquence axiale oblique plutôt que tout autre séquence.

Dans le cas des LCA rompus, la structure bifasciculaire est mal visible (<50% de la longueur du ligament) dans 65,9% des cas pour le lecteur 1 et 75% des cas pour le lecteur 2, en raison de l'œdème et de la désorganisation voire de la disparition complète des fibres ligamentaires. Les cas où les deux faisceaux restent discernables malgré une rupture correspondent à des désinsertions ligamentaires ou à des lésions ligamentaires focales ou partielles.

Dans notre étude, la reproductibilité inter-observateurs de la visibilité des faisceaux était bonne avec la séquence axiale oblique (k =0,64) malgré le caractère arbitraire de notre classification en 4 stades. Ce résultat est comparable à celui d'Adriaensen *et al* sur IRM 3T avec des séquences axiales obliques (k=0,49) et une classification similaire[4].

La reproductibilité de la distinction des deux faisceaux était meilleure qu'avec les séquences classiques seules (k=0,421).

L'effet de l'expérience sur la visibilité des deux faisceaux a été peu étudié. Starman *et al* n'ont montré qu'une faible tendance à une visibilité accrue et plus reproductible par un lecteur radiologue senior[83]. Dans notre étude, avec le protocole classique, le lecteur senior distinguait mieux les deux faisceaux du LCA que le lecteur junior (91,3% des cas contre 65,2%). Avec l'ajout de la séquence axiale oblique, cette différence s'efface et les deux lecteurs voient la structure bifasciculaire dans plus de 90% des cas. Le lecteur senior ne voit pas les deux faisceaux dans un plus grand nombre de cas avec la séquence axiale oblique, mais elle lui permet de voir les faisceaux sur une plus grande longueur. Le junior, quant à lui, gagne à la fois en nombre de cas où la structure bifasciculaire est vue et sur la longueur de visualisation des deux faisceaux.

En résumé, l'ajout de la séquence axiale oblique améliore la capacité à distinguer les deux faisceaux du LCA, la longueur sur laquelle les deux faisceaux sont bien distincts et la reproductibilité de cette distinction.
Ces apports sont prometteurs pour le diagnostic des ruptures partielles et leur description précise, qui nécessite de bien distinguer les deux faisceaux du LCA.

3.4.3 Analyse des résultats sur le niveau de confiance diagnostique

Dans notre étude, le niveau de confiance diagnostique était significativement plus élevé avec l'ajout de la séquence axiale oblique. Le degré de confiance de l'opérateur se trouvait accru qu'il s'agisse d'affirmer la rupture ou la normalité du LCA. Nous avons montré que ce degré de confiance était d'autant plus élevé que les deux faisceaux étaient bien délimités pour affirmer la normalité et d'autant plus élevé que les faisceaux étaient mal délimités pour affirmer la rupture. Dans le cas de la rupture, même complète, il arrivait qu'on distingue les deux faisceaux rompus et non tendus restant dans l'échancrure.

Le critère de confiance diagnostique était de reproductibilité médiocre avec l'échelle de kappa utilisée. Pour l'évaluation d'une valeur subjective telle que le niveau de confiance diagnostique, on aurait pu utiliser une échelle différente.

3.4.4 Limites de l'étude

Notre étude rencontre plusieurs limites :

Seuls les patients ayant bénéficié d'une exploration arthroscopique ont été inclus, ce qui constituait un biais de sélection. Ce choix s'imposait si l'on voulait prendre l'arthroscopie, « gold standard » classiquement utilisé, comme référence pour l'évaluation du statut du LCA.

Les arthroscopies ont été réalisées en ayant connaissance des résultats de l'IRM, afin que l'indication opératoire puisse être posée avec tout renseignement utile, ce qui constituait un biais de vérification. Ce biais est présent dans la plupart des études ayant l'arthroscopie pour référence et Nishikawa a montré que ses effets sur les résultats étaient limités[72].

Notre étude ne peut pas fournir d'éléments significatifs quant à l'évaluation des ruptures partielles, car il y a peu de rupture partielle dans notre série : 3 soit 4,5% de notre cohorte, contre 10 % et plus dans la littérature[24,25,84].

La séquence axiale oblique n'a pas été étudiée isolément, avec les potentiels biais liés à la visualisation de signes sur les autres séquences. Par exemple, une séquence coronale d'aspect tout à fait normal peut faire baisser l'attention sur un petit signe visible sur les axiales obliques, nuisant à la sensibilité. A contrario, on peut connaître une baisse de spécificité si des signes positifs sur les séquences classiques induisent une interprétation plus péjorative des coupes axiales obliques.

3.4.5 Perspectives

Nous avons montré que la séquence axiale oblique permettait non seulement de mieux visualiser le LCA et ses deux faisceaux mais également les tissus avoisinants. Dans certains cas, notamment les ruptures anciennes cicatricées, l'analyse de l'environnement péri-ligamentaire est très intéressante car le signal du ligament lui-même peut s'être complètement normalisé. Dans notre série, nous avons plusieurs cas d'hyposignaux DP annulaires péri-ligamentaires visibles sur la séquence axiale oblique (Fig. 37) correspondant probablement à du tissu cicatriciel. Ce signe, uniquement visible sur la séquence axiale oblique, du fait de la résolution spatiale, de l'obliquité du plan de coupe et de l'absence de saturation du signal de la graisse, n'a jamais été décrit en tant que tel et mériterait sans doute une étude sémiologique à part entière avec corrélation anatomo-pathologique.

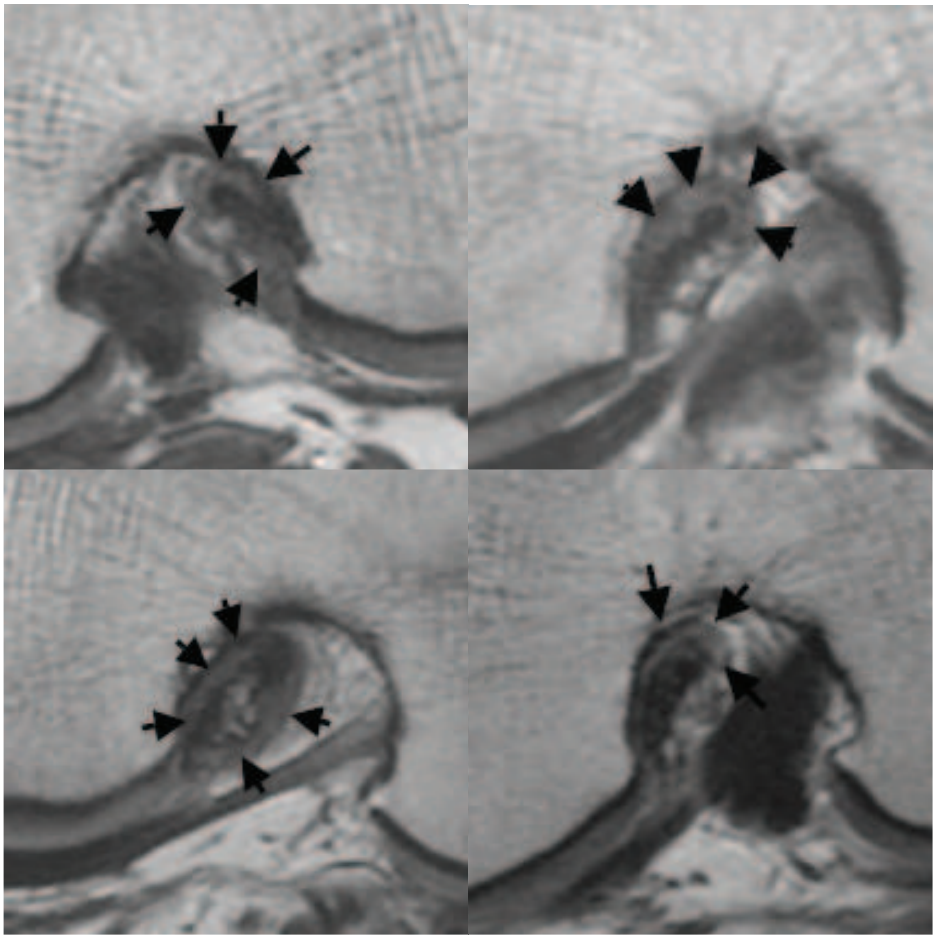


Fig.37. Hyposignaux annulaires péri-ligamentaires sur la séquence axiale oblique (flèches noires) chez 4 patients différents : un nouveau signe de cicatrisation fibreuse du LCA.

Une étude de plus grande amplitude est à envisager pour évaluer l'apport de la séquence axiale oblique sur le diagnostic et les modifications de prises en charge des ruptures partielles. L'analyse bifasciculaire des lésions peut en effet modifier le choix de la technique chirurgicale et orienter vers des techniques de reconstruction plus anatomiques : greffon tendineux doubles faisceaux ou reconstruction d'un seul faisceau. Les résultats fonctionnels à long terme pourraient être meilleurs qu'avec une plastie ligamentaire classique. Cette approche bifasciculaire, qui se fonde sur des études biomécaniques est cependant encore loin d'être généralisée chez les chirurgiens du genou.

Nous pourrions appliquer cette séquence en IRM à haut champ (3T et plus), ce qui devrait encore améliorer la distinction des deux faisceaux et donc leur analyse.

La séquence axiale oblique doit être évaluée pour le suivi des ligamentoplasties du LCA.

Conclusion

Notre étude valide l'apport de la séquence axiale oblique dans l'étude du LCA. Cette séquence continuera à compléter nos protocoles IRM dans le cas d'une demande portant sur le LCA ou dans le cas d'un LCA douteux sur les séquences du protocole classique. La séquence axiale oblique permet une meilleure visualisation du LCA et de sa structure bifasciculaire. Elle augmente les performances diagnostiques de l'examen et la confiance de l'observateur qu'il s'agisse d'affirmer la normalité ou la rupture.
Cette séquence permet l'analyse multicoupes de la morphologie ligamentaire et du signal intra- et péri-ligamentaire mais reste complémentaire des autres séquences qui donnent des informations sur l'orientation des faisceaux. Nous préconisons donc l'utilisation conjointe de l'ensemble des séquences orthogonales et obliques, en analyse multiplanaire.

Bibliographie

[1] **Otsubo H, Shino K, Suzuki D, Kamiya T, Suzuki T, Watanabe K, et al.** The arrangement and the attachment areas of three ACL bundles. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2012;20:127–34.

[2] **Tanaka Y, Shiozaki Y, Yonetani Y, Kanamoto T, Tsujii A, Horibe S**. MRI analysis of the attachment of the anteromedial and posterolateral bundles of anterior cruciate ligament using coronal oblique images. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2011;19 Suppl 1:S54–59.

[3] **Odensten M, Gillquist J**. Functional anatomy of the anterior cruciate ligament and a rationale for reconstruction. *J Bone Joint Surg Am* 1985;67:257–62.

[4] **Adriaensen MEAPM, Hogan B, Al-Bulushi HIJ, Kavanagh EC**. Double-bundle depiction of the anterior cruciate ligament at 3 Tesla. *Skeletal Radiol* 2012;41:831–4.

[5] **Steckel H, Starman JS, Baums MH, Klinger HM, Schultz W, Fu FH**. Anatomy of the anterior cruciate ligament double bundle structure: a macroscopic evaluation. *Scand J Med Sci Sports* 2007;17:387–92.

[6] **Jamison ST, Flanigan DC, Nagaraja HN, Chaudhari AMW**. Side-to-side differences in anterior cruciate ligament volume in healthy control subjects. *J Biomech* 2010;43:576–8.

[7] **Amis AA, Dawkins GP**. Functional anatomy of the anterior cruciate ligament. Fibre bundle actions related to ligament replacements and injuries. *J Bone Joint Surg Br* 1991;73:260–7.

[8] **Kato Y, Ingham SJM, Maeyama A, Lertwanich P, Wang JH, Mifune Y, et al.** Biomechanics of the human triple-bundle anterior cruciate ligament. *Arthroscopy* 2012;28:247–54.

[9] **Iwahashi T, Shino K, Nakata K, Nakamura N, Yamada Y, Yoshikawa H, et al.** Assessment of the "functional length" of the three bundles of the anterior cruciate ligament. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2008;16:167–74.

[10] **Dienst M, Burks RT, Greis PE**. Anatomy and biomechanics of the anterior cruciate ligament. *Orthop Clin North Am* 2002;33:605–620, v.

[11] **Butler DL, Noyes FR, Grood ES**. Ligamentous restraints to anterior-posterior drawer in the human knee. A biomechanical study. *J Bone Joint Surg Am* 1980;62:259–70.

[12] **Colombet P, Dejour D, Panisset J-C, Siebold R**. Current concept of partial anterior cruciate ligament ruptures. *Orthop Traumatol Surg Res* 2010;96:S109–118.

[13] **Duthon VB, Barea C, Abrassart S, Fasel JH, Fritschy D, Ménétrey J**. Anatomy of the anterior cruciate ligament. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2006;14:204–13.

[14] **Kaya A, Karadağ D, Güçlü B, Uçar F, Benli IT**. Evaluation of the two bundles of the anterior cruciate ligament with 1.5 tesla magnetic resonance imaging. *Acta Orthop Traumatol Turc* 2010;44:54–62.

[15] **Nakamae A, Ochi M, Deie M, Adachi N, Kanaya A, Nishimori M, et al.** Biomechanical function of anterior cruciate ligament remnants: how long do they contribute to knee stability after injury in patients with complete tears? *Arthroscopy* 2010;26:1577–85.

[16] **Petersen W, Zantop T**. Partial rupture of the anterior cruciate ligament. *Arthroscopy* 2006;22:1143–5.

[17] **Clayton RAE, Court-Brown CM**. The epidemiology of musculoskeletal tendinous and ligamentous injuries. *Injury* 2008;39:1338–44.

[18] **Gianotti SM, Marshall SW, Hume PA, Bunt L**. Incidence of anterior cruciate ligament injury and other knee ligament injuries: a national population-based study. *J Sci Med Sport* 2009;12:622–7.

[19] **Beldame Julien, Xavier Roussignol, Franck Dujardin**. Etude radio-clinique du ligament croisé antérieur. Etude prospective d'une cohorte de 112 patients. 2009.

[20] **Solomon DH, Simel DL, Bates DW, Katz JN, Schaffer JL**. The rational clinical examination. Does this patient have a torn meniscus or ligament of the knee? Value of the physical examination. *JAMA* 2001;286:1610–20.

[21] **DeFranco MJ, Bach BR Jr**. A comprehensive review of partial anterior cruciate ligament tears. *J Bone Joint Surg Am* 2009;91:198–208.

[22] **Roychowdhury S, Fitzgerald SW, Sonin AH, Peduto AJ, Miller FH, Hoff FL**. Using MR imaging to diagnose partial tears of the anterior cruciate ligament: value of axial images. *AJR Am J Roentgenol* 1997;168:1487–91.

[23] **Hong SH, Choi J-Y, Lee GK, Choi J-A, Chung HW, Kang HS**. Grading of anterior cruciate ligament injury. Diagnostic efficacy of oblique coronal magnetic resonance imaging of the knee. *J Comput Assist Tomogr* 2003;27:814–9.

[24] **Noyes FR, Mooar LA, Moorman CT 3rd, McGinniss GH**. Partial tears of the anterior cruciate ligament. Progression to complete ligament deficiency. *J Bone Joint Surg Br* 1989;71:825–33.

[25] **Ochi M, Adachi N, Deie M, Kanaya A**. Anterior cruciate ligament augmentation procedure with a 1-incision technique: anteromedial bundle or posterolateral bundle reconstruction. *Arthroscopy* 2006;22:463.e1–5.

[26] **Siebold R, Fu FH**. Assessment and augmentation of symptomatic anteromedial or posterolateral bundle tears of the anterior cruciate ligament. *Arthroscopy* 2008;24:1289–98.

[27] **DeHaven KE, Collins HR**. Diagnosis of internal derangements of the knee. The role of arthroscopy. *J Bone Joint Surg Am* 1975;57:802–10.

[28] **Fischer SP, Fox JM, Del Pizzo W, Friedman MJ, Snyder SJ, Ferkel RD**. Accuracy of diagnoses from magnetic resonance imaging of the knee. A multi-center analysis of one thousand and fourteen patients. *J Bone Joint Surg Am* 1991;73:2–10.

[29] **Pao DG**. The lateral femoral notch sign. *Radiology* 2001;219:800–1.

[30] **Campos JC, Chung CB, Lektrakul N, Pedowitz R, Trudell D, Yu J, et al.** Pathogenesis of the Segond fracture: anatomic and MR imaging evidence of an iliotibial tract or anterior oblique band avulsion. *Radiology* 2001;219:381–6.

[31] **Schulz MS, Russe K, Lampakis G, Strobel MJ**. Reliability of stress radiography for evaluation of posterior knee laxity. *Am J Sports Med* 2005;33:502–6.

[32] **Garavaglia G, Lubbeke A, Dubois-Ferrière V, Suva D, Fritschy D, Menetrey J**. Accuracy of stress radiography techniques in grading isolated and combined posterior knee injuries: a cadaveric study. *Am J Sports Med* 2007;35:2051–6.

[33] **Kalke RJ, Di Primio GA, Schweitzer ME**. MR and CT arthrography of the knee. *Semin Musculoskelet Radiol* 2012;16:57–68.

[34] **De Filippo M, Bertellini A, Pogliacomi F, Sverzellati N, Corradi D, Garlaschi G, et al.** Multidetector computed tomography arthrography of the knee: diagnostic accuracy and indications. *Eur J Radiol* 2009;70:342–51.

[35] **Vande Berg BC, Lecouvet FE, Poilvache P, Dubuc J-E, Maldague B, Malghem J**. Anterior cruciate ligament tears and associated meniscal lesions: assessment at dual-detector spiral CT arthrography. *Radiology* 2002;223:403–9.

[36] **Palm H-G, Bergenthal G, Ehry P, Schwarz W, Schmidt R, Friemert B**. Functional ultrasonography in the diagnosis of acute anterior cruciate ligament injuries: a field study. *Knee* 2009;16:441–6.

[37] **Oei EHG, Nikken JJ, Verstijnen ACM, Ginai AZ, Myriam Hunink MG**. MR imaging of the menisci and cruciate ligaments: a systematic review. *Radiology* 2003;226:837–48.

[38] **Crawford R, Walley G, Bridgman S, Maffulli N**. Magnetic resonance imaging versus arthroscopy in the diagnosis of knee pathology, concentrating on meniscal lesions and ACL tears: a systematic review. *Br Med Bull* 2007;84:5–23.

[39] **Kocabey Y, Tetik O, Isbell WM, Atay OA, Johnson DL**. The value of clinical examination versus magnetic resonance imaging in the diagnosis of meniscal tears and anterior cruciate ligament rupture. *Arthroscopy* 2004;20:696–700.

[40] **Glashow JL, Katz R, Schneider M, Scott WN**. Double-blind assessment of the value of magnetic resonance imaging in the diagnosis of anterior cruciate and meniscal lesions. *J Bone Joint Surg Am* 1989;71:113–9.

[41] **Vincken PWJ, ter Braak BPM, van Erkell AR, de Rooy TPW, Mallens WMC, Post W, et al.** Effectiveness of MR imaging in selection of patients for arthroscopy of the knee. *Radiology* 2002;223:739–46.

[42] **Rayan F, Bhonsle S, Shukla DD**. Clinical, MRI, and arthroscopic correlation in meniscal and anterior cruciate ligament injuries. *Int Orthop* 2009;33:129–32.

[43] **Munshi M, Davidson M, MacDonald PB, Froese W, Sutherland K**. The efficacy of magnetic resonance imaging in acute knee injuries. *Clin J Sport Med* 2000;10:34–9.

[44] **Cotten A, Delfaut E, Demondion X, Lapègue F, Boukhelifa M, Boutry N, et al.** MR imaging of the knee at 0.2 and 1.5 T: correlation with surgery. *AJR Am J Roentgenol* 2000;174:1093–7.

[45] **Sampson MJ, Jackson MP, Moran CJ, Shine S, Moran R, Eustace SJ**. Three Tesla MRI for the diagnosis of meniscal and anterior cruciate ligament pathology: a comparison to arthroscopic findings. *Clin Radiol* 2008;63:1106–11.

[46] **Van Dyck P, Vanhoenacker FM, Gielen JL, Dossche L, Van Gestel J, Wouters K, et al.** Three tesla magnetic resonance imaging of the anterior cruciate ligament of the knee: can we differentiate complete from partial tears? *Skeletal Radiol* 2011;40:701–7.

[47] **Burk DL Jr, Kanal E, Brunberg JA, Johnstone GF, Swensen HE, Wolf GL**. 1.5-T surface-coil MRI of the knee. *AJR Am J Roentgenol* 1986;147:293–300.

[48] **Lee SY, Matsui N, Yoshida K, Doi R, Matsushima S, Wakami T, et al.** Magnetic resonance delineation of the anterior cruciate ligament of the knee: flexed knee position within a surface coil. *Clin Imaging* 2005;29:117–22.

[49] **Niitsu M, Ikeda K, Itai Y**. Slightly flexed knee position within a standard knee coil: MR delineation of the anterior cruciate ligament. *Eur Radiol* 1998;8:113–5.

[50] **Buckwalter KA, Pennes DR**. Anterior cruciate ligament: oblique sagittal MR imaging. *Radiology* 1990;175:276–7.

[51] **Do-Dai DD, Stracener JC, Youngberg RA**. Oblique sagittal MRI of anterior cruciate ligament. *J Comput Assist Tomogr* 1994;18:160–2.

[52] **Barberie JE, Carson BW, Finnegan M, Wong AD**. Oblique sagittal view of the anterior cruciate ligament: comparison of coronal vs. axial planes as localizing sequences. *J Magn Reson Imaging* 2001;14:203–6.

[53] **Breitenseher MJ, Mayerhoefer ME**. Oblique MR imaging of the anterior cruciate ligament based on three-dimensional orientation. *J Magn Reson Imaging* 2007;26:794–8.

[54] **Kwon JW, Yoon YC, Kim YN, Ahn JH, Choe BK**. Which oblique plane is more helpful in diagnosing an anterior cruciate ligament tear? *Clin Radiol* 2009;64:291–7.

[55] **Duc SR, Zanetti M, Kramer J, Käch KP, Zollikofer CL, Wentz KU**. Magnetic resonance imaging of anterior cruciate ligament tears: evaluation of standard orthogonal and tailored paracoronal images. *Acta Radiol* 2005;46:729–33.

[56] **Katahira K, Yamashita Y, Takahashi M, Otsuka N, Koga Y, Fukumoto T, et al.** MR imaging of the anterior cruciate ligament: value of thin slice direct oblique coronal technique. *Radiat Med* 2001;19:1–7.

[57] **Ng AWH, Griffith JF, Law KY, Ting JWM, Tipoe GL, Ahuja AT, et al.** Oblique axial MR imaging of the normal anterior cruciate ligament bundles. *Skeletal Radiol* 2011;40:1587–94.

[58] **Smith DK, May DA, Phillips P**. MR imaging of the anterior cruciate ligament: frequency of discordant findings on sagittal-oblique images and correlation with arthroscopic findings. *AJR Am J Roentgenol* 1996;166:411–3.

[59] **Jung JY, Yoon YC, Kwon JW, Ahn JH, Choe B-K**. Diagnosis of internal derangement of the knee at 3.0-T MR imaging: 3D isotropic intermediate-weighted versus 2D sequences. *Radiology* 2009;253:780–7.

[60] **Remer EM, Fitzgerald SW, Friedman H, Rogers LF, Hendrix RW, Schafer MF**. Anterior cruciate ligament injury: MR imaging diagnosis and patterns of injury. *Radiographics* 1992;12:901–15.

[61] **Fitzgerald SW, Remer EM, Friedman H, Rogers LF, Hendrix RW, Schafer MF**. MR evaluation of the anterior cruciate ligament: value of supplementing sagittal images with coronal and axial images. *AJR Am J Roentgenol* 1993;160:1233–7.

[62] **Chen W-T, Shih TT-F, Tu H-Y, Chen R-C, Shau W-Y**. Partial and complete tear of the anterior cruciate ligament. *Acta Radiol* 2002;43:511–6.

[63] **Prince JS, Laor T, Bean JA**. MRI of anterior cruciate ligament injuries and associated findings in the pediatric knee: changes with skeletal maturation. *AJR Am J Roentgenol* 2005;185:756–62.

[64] **Huang G-S, Lee C-H, Chan WP, Lee H-S, Chen C-Y, Yu JS**. Acute anterior cruciate ligament stump entrapment in anterior cruciate ligament tears: MR imaging appearance. *Radiology* 2002;225:537–40.

[65] **Brandser EA, Riley MA, Berbaum KS, el-Khoury GY, Bennett DL**. MR imaging of anterior cruciate ligament injury: independent value of primary and secondary signs. *AJR Am J Roentgenol* 1996;167:121–6.

[66] **Chiu SS**. The anterior tibial translocation sign. *Radiology* 2006;239:914–5.

[67] **Mellado JM, Calmet J, Olona M, Giné J, Saurí A**. Magnetic resonance imaging of anterior cruciate ligament tears: reevaluation of quantitative parameters and imaging findings including a simplified method for measuring the anterior cruciate ligament angle. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2004;12:217–24.

[68] **Oldrini G, Teixeira PG, Chanson A, Erpelding ML, Osemont B, Louis M, et al.** MRI appearance of the distal insertion of the anterior cruciate ligament of the knee: an additional criterion for ligament ruptures. *Skeletal radiology* [Internet] 2012.

[69] **Al-Dadah O, Shepstone L, Marshall TJ, Donell ST**. Secondary signs on static stress MRI in anterior cruciate ligament rupture. *Knee* 2011;18:235–41.

[70] **Donell ST, Marshall TJ, Darrah C, Shepstone L**. Cruciate ligament assessment in MRI scans: a pilot study of a static drawer technique. *Knee* 2006;13:137–44.

[71] **Van Dyck P, De Smet E, Veryser J, Lambrecht V, Gielen JL, Vanhoenacker FM, et al.** Partial tear of the anterior cruciate ligament of the knee: injury patterns on MR imaging. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2012;20:256–61.

[72] **Nishikawa H, Imanaka Y, Sekimoto M, Ikai H**. Verification bias in assessment of the utility of MRI in the diagnosis of cruciate ligament tears. *AJR Am J Roentgenol* 2010;195:W357–364.

[73] **Lawrance JA, Ostlere SJ, Dodd CA**. MRI diagnosis of partial tears of the anterior cruciate ligament. *Injury* 1996;27:153–5.

[74] **Sonnery-Cottet B, Barth J, Graveleau N, Fournier Y, Hager J-P, Chambat P**. Arthroscopic identification of isolated tear of the posterolateral bundle of the anterior cruciate ligament. *Arthroscopy* 2009;25:728–32.

[75] **Panisset J-C, Duraffour H, Vasconcelos W, Colombet P, Javois C, Potel J-F, et al.** [Clinical, radiological and arthroscopic analysis of the ACL tear. A prospective study of 418 cases]. *Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot* 2008;94:362–8.

[76] **Higueras Guerrero V, Torregrosa Andrés A, Martí-Bonmatí L, Casillas C, Sanfeliu M**. Synovialisation of the torn anterior cruciate ligament of the knee: comparison between magnetic resonance and arthroscopy. *Eur Radiol* 1999;9:1796–9.

[77] **Melloni P, Valls R, Yuguero M, Sáez A**. Mucoid degeneration of the anterior cruciate ligament with erosion of the lateral femoral condyle. *Skeletal Radiol* 2004;33:359–62.

[78] **DeLong ER, DeLong DM, Clarke-Pearson DL**. Comparing the areas under two or more correlated receiver operating characteristic curves: a nonparametric approach. *Biometrics* 1988;44:837–45.

[79] **Kim A, Khoury L, Schweitzer M, Jazrawi L, Ishak C, Meislin R, et al.** Effect of specialty and experience on the interpretation of knee MRI scans. *Bull NYU Hosp Jt Dis* 2008;66:272–5.

[80] **Krampla W, Roesel M, Svoboda K, Nachbagauer A, Gschwantler M, Hruby W**. MRI of the knee: how do field strength and radiologist's experience influence diagnostic accuracy and interobserver correlation in assessing chondral and meniscal lesions and the integrity of the anterior cruciate ligament? *Eur Radiol* 2009;19:1519–28.

[81] **Ng AWH, Griffith JF, Hung EHY, Law KY, Yung PSH**. MRI diagnosis of ACL bundle tears: value of oblique axial imaging. *Skeletal radiology* [Internet] 2012 [cited 2012 Aug 11];Available from: http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22349646

[82] **Montoy M, Euvrard T, Moyen B, Roy P, Rollier JC, Cotton F**. Inter-observer agreement in the identification of the two bundles of the anterior cruciate ligament using magnetic resonance imaging. *Surg Radiol Anat* 2008;30:557–62.

[83] **Starman JS, Vanbeek C, Armfield DR, Sahasrabudhe A, Baker CL 3rd, Irrgang JJ, et al.** Assessment of normal ACL double bundle anatomy in standard viewing planes by magnetic resonance imaging. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2007;15:493–9.

[84] **Umans H, Wimpfheimer O, Haramati N, Applbaum YH, Adler M, Bosco J**. Diagnosis of partial tears of the anterior cruciate ligament of the knee: value of MR imaging. *AJR Am J Roentgenol* 1995;165:893–7.

Résumé

Objectif : Déterminer l'apport de la séquence axiale oblique dans l'étude du ligament croisé antérieur (LCA) en imagerie par résonnance magnétique (IRM).

Méthode : Les images IRM de 67 patients (50 hommes, 17 femmes) ayant bénéficié d'une arthroscopie au CHU de Rouen entre juin 2010 et décembre 2011, ont été relues rétrospectivement et indépendamment par 2 radiologues musculo-squelettiques (1 junior, 1 senior) selon 2 protocoles : séquences classiques 3 plans DP fat sat (protocole 1), séquences classiques plus une séquence axiale oblique DP perpendiculaire à l'axe du LCA (protocole 2). Les ligaments croisés antérieurs étaient classés en 3 groupes : rupture complète, rupture partielle, ligament normal. Les sensibilités et spécificités pour chaque protocole et chaque lecteur ont été calculées, avec l'arthroscopie comme référence. Des courbes ROC ont été déterminées et les aires sous la courbe comparées selon la méthode de DeLong. Les corrélations inter-observateurs et intra-observateur ont été déterminées par le calcul de coefficients de kappa.

Résultats : L'arthroscopie a trouvé 37 ruptures complètes de LCA (55,2%), 3 ruptures partielles (4,5%) et 27 LCA normaux (40,3%). Les sensibilités étaient, respectivement pour les lecteurs senior et junior, de 65.91/79.55 pour le protocole 1, et de 81,82/81,82 pour le protocole 2. Les spécificités étaient respectivement pour les lecteurs senior et junior de 95,67/78,26 pour le protocole 1 et de 91,3/ 95,65 pour le protocole 2. Pour les deux lecteurs, les aires sous la courbe ROC du protocole 2 étaient supérieures à celles du protocole 1. La différence atteint la significativité statistique pour le lecteur junior (p = 0,02), mais pas pour le lecteur senior (p=0,22). La reproductibilité d'évaluation du statut du LCA était bonne pour le protocole 1 (k=0,707), excellente pour le protocole 2 (k = 0,849). La reproductibilité intra-observateur pour l'évaluation du statut du LCA avec le protocole 2 était excellente (k=0,88).

Conclusion : Le protocole incluant la séquence axiale oblique perpendiculaire au LCA améliore les performances diagnostiques de l'IRM pour l'évaluation du LCA ainsi que sa reproductibilité. L'apport diagnostique semble particulièrement marqué pour un lecteur junior.

Niveau de preuve : Etude rétrospective sur des patients consécutifs. Niveau III

Mots clés : ligament croisé antérieur, imagerie par résonnance magnétique, rupture ligamentaire, arthroscopie de genou, axiale oblique.