Université de Nantes FACULTE DE MEDECINE

Année 2014 N°

THESE

pour le

DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN MEDECINE

DES de Chirurgie Générale DESC Orthopédie et traumatologie

par

Thibaut NOAILLES

né le 20 septembre 1985 à Paris (75015)

Présentée et soutenue publiquement le 14 octobre 2014

ANATOMIE EN RUBAN
DU LIGAMENT CROISE ANTERIEUR

Président du jury : Monsieur le Professeur GOUIN

Directeur de thèse: Monsieur le Docteur BOISRENOULT

Membres du jury : Monsieur le Professeur PASSUTI

Monsieur le Professeur GAGEY

Monsieur le Docteur LOPES

REMERCIEMENTS

A notre Maître, Président du Jury,

Monsieur le Professeur GOUIN,

Professeur des Universités de Chirurgie Orthopédique et Traumatologique,

Chirurgien des Hôpitaux,

Chef de Service.

Vous me faites l'honneur de présider cette thèse,

Votre habileté chirurgicale et vos connaissances forcent l'admiration,

Passer un semestre à vos cotés fut riche d'enseignements pour mon futur, je vous en serais toujours reconnaissant,

Veuillez trouver ici le témoignage de mon plus profond respect.

A mon directeur de Thèse,

Monsieur le Docteur BOISRENOULT,

Chirurgien des Hôpitaux,

Votre présence dans mon jury est un honneur,

Mon passage dans votre Service fut une véritable révélation,

Votre passion pour l'orthopédie, votre grande disponibilité pour l'enseignement et votre humour laissent un souvenir impérissable,

J'espère ne pas vous décevoir avec ce travail,

Veuillez croire en ma profonde reconnaissance.

A notre Maître,

Monsieur le Professeur PASSUTI,

Professeur des Universités de Chirurgie Orthopédique et Traumatologique,

Chirurgien des Hôpitaux,

Chef de Pôle.

Vos connaissances et votre disponibilité sont pour nous des exemples,

Votre dynamisme et votre humour sont essentiels à notre évolution dans le service,

Je vous remercie d'avoir répondu avec gentillesse à cette invitation,

Veuillez trouver ici le témoignage de ma profonde reconnaissance et de ma gratitude.

Monsieur le Professeur GAGEY,

Professeur des Universités de Chirurgie Orthopédique et Traumatologique,

Chirurgien des Hôpitaux, Chef de Service,

Je vous remercie d'avoir accepté de juger ce travail,

Votre présence dans ce jury est un honneur,

Votre esprit scientifique et vos connaissances chirurgicales sont sans équivoque,

Veuillez trouver ici le témoignage de ma reconnaissance et de mon profond respect.

Monsieur le Docteur LOPES,

Praticien Libéral,

Tes talents de chirurgien n'ont d'égal que tes qualités humaines et ta disponibilité. Ton seul défaut est de supporter l'OM, je ne t'en tiens pas rigueur.

Tout ce temps passé en ta compagnie, à l'hôpital ou ailleurs, restera un souvenir essentiel de mon internat,

Trouve ici le témoignage de mon amitié.

A Myriam

Pour ta complicité, pour toutes les joies passées, présentes et futures et pour ton soutien permanent,

Ce que nous allons construire sera beau!

Ce travail ne suffit pas à te témoigner tout mon amour.

A mes parents,

Pour votre dévouement et votre soutien de toujours,

Puissiez-vous trouver ici le témoignage de mon amour,

On se voit trop peu mais Dieu sait combien je vous aime.

A Camille et Marie Colombe,

Je vous le dis trop peu mais je vous aime!

A Bonnie et Pérou,

Vous êtes ce que j'ai de plus cher.

A la Sous Colle et famille, Stanislas, Grégoire et Antoine,

Ca dure depuis plus de 10 ans et ce n'est que le début!

A Alexis et Ben,

Venir avec vous à Nantes est l'une de mes plus belles décisions,

On ne se quitte plus!

A Jad,

Tu sais ce que tu représentes pour moi.

A mes Amis : Jean, Godefroy, Paul, Julien, Fx, Guillaume, Florian, Alice, Agathe, Clément et Vio, Mitou, Mouna, Justine, Albe, Raph, Claire, Segolène, Pauline ...

Puisse l'avenir nous laisser plus de temps à passer ensemble.

Sachez que vous êtes indissociables de chacun de mes instants de bonheur.

A Kevin et Antoine,

Etre co-interne à vos côtés est juste un bonheur.

Votre niveau d'humour est international, surtout après 3 Chouffes.

A la Jet 15,

Dont la médecine dévoreuse de temps m'a trop souvent éloigné,

Vous êtes magique!

A Céleste et Louis,

Les deux merveilles.

A mes chefs et mentors,

Professeur Philippe BEAUFILS, avoir travaillé pour vous restera un moment fort de mon internat,

Denis WAAST, Un exemple professionnel et humain,

Pierre Marie LONGIS, « Rakikman », un chef mais surtout un ami,

Nicolas PUJOL, Ton talent chirurgical a toujours suscité mon admiration,

Guillaume GADBLED, Au cours de ces dernières années, tu as toujours su m'accorder du temps et répondre à mes questions, merci,

Guy PIETU, si un jour j'atteins ton niveau en traumatologie, alors j'aurais réussi.

A mes chefs et amis:

Nicolas, Fabrice, Ronan, Loïc, Romain, Kevin, Alexandre, Camille, Quentin, Ali.

A mes co internes et amis:

Laurent, Giovanni, Kevin, Joseph, Mathieu, Jeremy, Jean Baptiste, Cécile, Djamel.

A Mignot:

Aymeric, Mathieu et JS, je pleure de rire en pensant à vos tronches.

A ceux qui ont participé à ma formation chirurgicale :

Mesdames et Messieurs les Docteurs Soubiguou, Le Cour Grandmaison, Fraquet, Venet, Tesson, Girard, Jamard, Hauet, Touchais, Delecrin, Cappelli, Al Homsi, Hamdaï, Moui, Pidhorz, De Cervens, Gachard, Pujol, Desmoineaux, Oger, Wakim.

A Marc Dupond,

C'est en partie grâce à toi que je suis là aujourd'hui à présenter cette thèse.

A tous le personnel des services d'Orthopédie (Brigitte, Roselyne, Sévérine, Sandrine), et du bloc (Maeva, Katell, Sylvie, Laetitia, Manu, Franck, Philippe, Damien, Olivier et Christophe les Vendéens):

La vie est une fête quand on travaille avec vous!

SERMENT MEDICAL

Au moment d'être admis à exercer la médecine, je promets et je jure d'être fidèle aux lois de l'honneur et de la probité.

Mon premier souci sera de rétablir, de préserver ou de promouvoir la santé dans tous ses éléments, physiques et mentaux, individuels et sociaux.

Je respecterai toutes les personnes, leur autonomie et leur volonté, sans aucune discrimination selon leur état ou leurs convictions. J'interviendrai pour les protéger si elles sont affaiblies, vulnérables ou menacées dans leur intégrité ou leur dignité. Même sous la contrainte, je ne ferai pas usage de mes connaissances contre les lois de l'humanité.

J'informerai les patients des décisions envisagées, de leurs raisons et de leurs conséquences. Je ne tromperai jamais leur confiance et n'exploiterai pas le pouvoir hérité des circonstances pour forcer les consciences.

Je donnerai mes soins à l'indigent et à quiconque me les demandera. Je ne me laisserai pas influencer par la soif du gain ou la recherche de la gloire.

Admis dans l'intimité des personnes, je tairai les secrets qui me seront confiés. Reçu à l'intérieur des maisons, je respecterai les secrets des foyers et ma conduite ne servira pas à corrompre les mœurs.

Je ferai tout pour soulager les souffrances. Je ne prolongerai pas abusivement les agonies. Je ne provoquerai jamais la mort délibérément.

Je préserverai l'indépendance nécessaire à l'accomplissement de ma mission. Je n'entreprendrai rien qui dépasse mes compétences. Je les entretiendrai et les perfectionnerai pour assurer au mieux les services qui me seront demandés.

J'apporterai mon aide à mes confrères ainsi qu'à leurs familles dans l'adversité.

Que les hommes et mes confrères m'accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses ; que je sois déshonoré et méprisé si j'y manque.

ABREVIATIONS

LCA Ligament croisé antérieur
LCP Ligament croisé postérieur
FAM Faisceau antéro-médial
FPL Faisceau postéro-latéral
AP antéro-postérieur
ML médio-latéral
SFA Société Française d'Arthroscopie
AM antéro-médial
PL postéro-latéral
N Newton
DIDT Droit Interne - Demi tendineux
IKDC International Knee Documentation Committee

MM Millimètres

TABLE DES MATIERES

Introduction	Page 10
Matériels et Méthodes	Page 25
Résultats	Page 29
Discussion	Page 34
Conclusion	Page 41
Annexes	Page 42
Références	Page 46
Résumé/Abstract	Page 54

INTRODUCTION

La chirurgie de reconstruction du ligament croisé antérieur (LCA) du genou est une intervention chirurgicale fréquente. Son indication principale est le traitement d'une instabilité du genou après rupture du ligament croisé antérieur. Les recommandations professionnelles rédigées sous l'égide de la HAS ont précisé les indications selon les situations cliniques [HAS 2008] (cf. annexes I) mais ces modalités pratiques restent débattues. Les résultats fonctionnels et cliniques sont bons (1, 2) mais perfectibles avec seulement 25% des patients classés IKDC A (3).

Depuis **GREKOV** et **HEY GROVES** (4, 5), il est le plus souvent proposé des reconstructions « anatomiques » du LCA dans le but d'essayer d'optimiser les résultats fonctionnels. La description princeps du LCA a été effectuée par Claudius Galen de Pergame (Figure 1), plus connu sous le nom de **GALIEN** (6). A partir de l'exploration de plaies humaines chez les gladiateurs (« *fenêtres sur le corps* ») et de vivisections animales, il décrivit les ligaments croisés sous le nom de « *genu cruciatta* ».



Figure 1 Galien de Pergame (129 av JC - 216 v JC), Gravure du XVIème siècle.

Ensuite, peu d'auteurs s'intéressent au LCA, jusqu'aux frères WEBER en 1836 (7). Ils publient le traité « *Mechanik der menschlichen Gehwerkzeuge* » (Figure 2 et 3) (étude des mécanismes de la marche humaine) qui devient la base de la description anatomique des ligaments croisés. Ils décomposent les mouvements grâce à un appareil stroboscopique. Ils décrivent un LCA constitué de deux faisceaux distincts avec des modèles de tension indépendants lors du passage de la flexion à l'extension. Lors de ce mouvement, ils évoquent pour la première fois une torsion des fibres sur elles mêmes. Ces travaux seront confirmés en 1858, par KARL LANGER (8) (1819 - 1887), anatomiste à VIENNE.

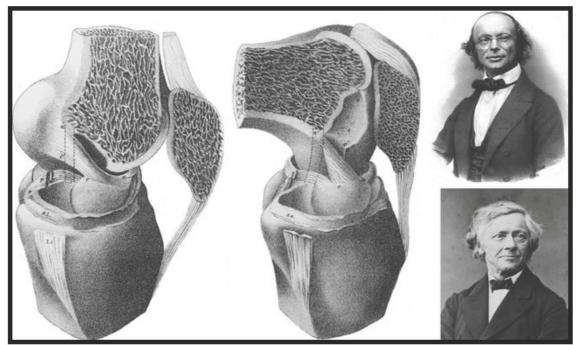


Figure 2 Premières illustrations décrivant le LCA. Il est alors constitué selon les frères WEBER de deux faisceaux aux comportements tensionnels distincts. Wilhelm (1804 - 1891) (en haut à droite) était Professeur de Physique à GOTTINGEN et Eduard (1806 - 1871) (en bas à droite) était Professeur d'Anatomie à LEIPZIG.

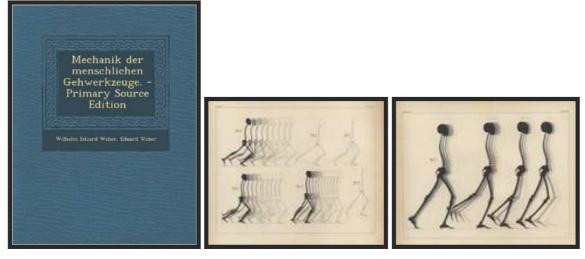


Figure 3 Weber W, Weber E. Mechanik der menschlichen Gehwerkzeuge. Göttingen: Dieterichsche Buchhandlung; 1836.

En 1837, **ROBERT ADAMS** (9) (Figure 4) décrivit le mécanisme lésionnel d'une rupture du LCA, comme un genou « *qui cède dans un soudain moment de faiblesse, puis se remplit de liquide synovial* ». Il mentionne alors les différents types de ruptures fémorales, tibiales ou en plein corps. Il précise également le trajet anatomique du LCA et s'intéresse à ses insertions osseuses, en précisant qu'elles sont puissantes et peuvent favoriser une avulsion osseuse.





Figure 4 Robert Adams de DUBLIN (1791 - 1875) est le premier à décrire la rupture du LCA.

Les premières descriptions de reconstructions anatomiques du LCA ont été proposées en 1917 par HEY GROVES (Figure 5) (10). Ce dernier insiste sur le trajet du LCA, oblique de haut en bas et de dehors en dedans. Il note aussi la nécessité d'un positionnement anatomique, primordial pour rétablir la fonction, « in contradistinction to a mere passage of new ligaments across the knee joint ». Il est le premier à reconnaître l'importance du trajet oblique du LCA reconstruit « as new ligament which is used to replace them should be given this oblique direction, even in an exaggerated degree, because an anterior ligament will be efficient in preventing anterior tibial displacement in proportion to its obliquity ». Ce principe mécanique fondamental, dans la stabilité rotatoire notamment, n'a été repris que 80 ans plus tard par Fu et al. (11).

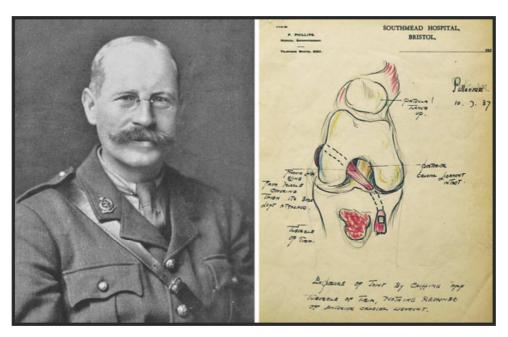


Figure 5 Photographie d'ERNEST WILLIAM HEY GROVES (1872 - 1944), et dessin original de 1937 décrivant sa technique de reconstruction du LCA.

Malgré des descriptions anciennes (cf. annexes II), l'anatomie du LCA en raison de ses implications thérapeutiques reste un sujet de controverse dans la communauté orthopédique. Ainsi, une recherche bibliographique sur Pubmed [®] avec pour mots clés « anatomy AND anterior cruciate ligament », retrouve 3863 références.

Les descriptions actuelles, les plus fréquentes sont les suivantes.

Macroscopiquement, le ligament croisé antérieur est tendu entre la face axiale du condyle fémoral latéral et le tibia en regard de l'épine tibiale médiale. Son trajet est oblique en bas, en avant et en dedans. Il comprend des fibres parallèles de collagènes (essentiellement types I et III) avec deux contingents identifiables par un degré de tension différent lors de la mobilisation en flexion-extension du genou.

Pour la majorité des auteurs (12, 13), ces deux faisceaux sont antéro médial (AM) et postéro latéral (PL). Les fibres qui prennent leur origine sur la partie proximale de l'insertion fémorale s'insèrent sur la partie antérieure de l'insertion tibiale. Celles issues de la partie distale de l'insertion fémorale s'insèrent sur la partie postérieure de l'insertion tibiale. Les fibres de la marge postérieure de l'insertion fémorale sont insérées sur la partie médiale du tibia et les fibres originaires de la partie antérieure de l'insertion fémorale s'insèrent latéralement sur le tibia. Enfin, les fibres centrales restent invariables.

Les fibres les plus postérieures de l'insertion fémorale en extension deviennent alors les plus antérieures en flexion. Les fibres antérieures mesurent en moyenne 37 ± 4 mm de longueur. Elles se raccourcissent progressivement vers l'arrière, puisque les fibres les plus postérieures mesurent en moyenne 24 ± 4 mm (14). Des plans de clivage, souvent incomplets, permettent de séparer le ligament en ces deux faisceaux principaux AM et PL. Certains auteurs ont également décrit un troisième faisceau (15, 16). En extension, les fibres du LCA s'orientent, dans le plan sagittal, de manière parallèle et les deux faisceaux sont tendus. Lors de la flexion, le LCA décrit une légère rotation externe entraînant un enroulement du faisceau AM (FAM) qui se tend, autour du faisceau PL (FPL) qui se détend (Figure 7).

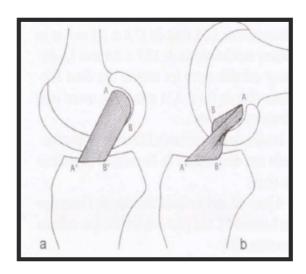


Figure 7 Comportement des faisceaux AM (AA') et PL (BB') du LCA, en extension (a) et en flexion (b).

En extension, le LCA a un bord antérieur concave grâce à une disposition particulière de ses fibres, lui permettant d'échapper au bord proximal de l'échancrure intercondylienne (Figure 8).

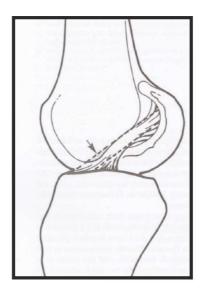


Figure 8 Le bord antérieur concave du LCA permet d'éviter un conflit avec l'échancrure.

Les insertions tibiales et fémorales ont également fait l'objet de multiples études. En effet, le positionnement anatomique des tunnels est un facteur conditionnant la réussite d'une reconstruction du LCA (17). Concernant les insertions tibiales, leur description est la suivante (18-23):

La partie la plus antérieure, de l'insertion tibiale se situe 2 à 3 mm en arrière de l'insertion antérieure du ménisque médial et est convexe en avant (Figure 9). L'espace maximum entre les fibres antérieures et le ménisque médial est de 8 mm (24) En médial, cette insertion longe le cartilage articulaire tibial. Il n'y a aucune fibre insérée sur la partie supérieure de l'épine tibiale médiale.

L'insertion tibiale est en constante relation avec la partie antérieure du ménisque latéral. Du côté tibial, la longueur antéro-postérieure de l'insertion du LCA est de $17,6\pm2,1$ mm et sa largeur médio-latérale de $12,7\pm2,8$ mm. La distance calculée entre les centres des deux faisceaux est de $9,6\pm2,11$ mm (25). Par ailleurs, la taille de l'insertion tibiale du LCA est proportionnelle aux dimensions de l'extrémité supérieure du tibia (18) et du fait de la forme en « patte de canard » de l'insertion tibiale du LCA (26), le centre d'un faisceau ne coïncide pas avec le centre de la surface de son insertion osseuse. L'insertion tibiale est plus large de 120% par rapport à l'insertion fémorale (27).

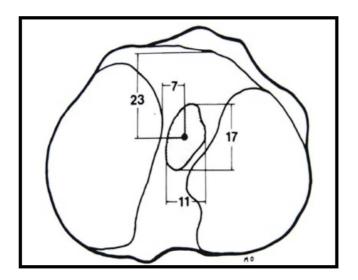


Figure 9 Position de l'insertion tibiale du LCA d'après Odensten (28).

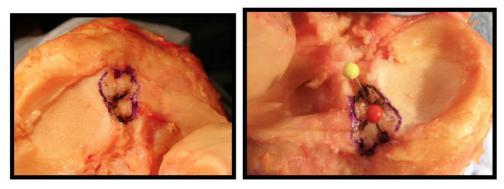


Figure 10 Insertion tibiale des FAM (rouge) et FPL (jaune) selon Bicer et al. (29).

De même, l'insertion fémorale a fait l'objet d'études anatomiques récentes (21, 23, 30-33). Sur le condyle latéral, le site d'insertion fémorale du LCA a une forme de demi cercle avec la partie convexe qui suit le cartilage articulaire et la partie antérieure qui est orientée à 26° par rapport à l'axe

longitudinal du fémur (Figure 11 et 12). Les fibres les plus antéro supérieures sont attachées 2 mm en avant de la jonction entre le toit et la partie latérale de l'échancrure intercondylienne. L'insertion fémorale du LCA mesure près de 18,3 mm de longueur et 10,3 mm de largeur selon les séries (27, 34).

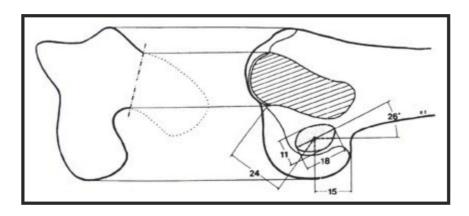


Figure 11 Position de l'insertion fémorale du LCA d'après Odensten (28).

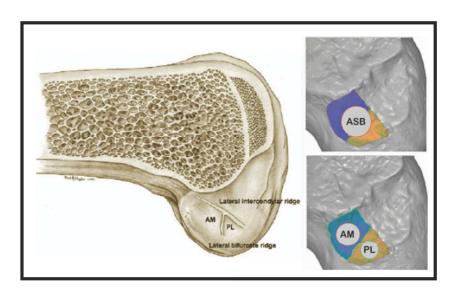


Figure 12 Positionnement du tunnel fémoral (anatomic single-bundle (ASB) or double-bundle (AM & PL)) selon FU (35).

La connaissance du développement embryologique apporte des éléments utiles.

Le LCA dérive de la capsule articulaire du genou (36-40). Du point de vue embryologique, la formation du genou débute lors de la quatrième semaine de gestation et des fibres de LCA sont présentes dès la huitième semaine (Figure 13) (41).

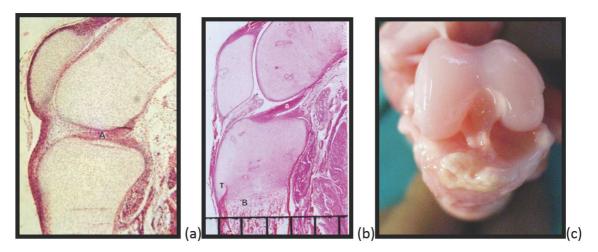


Figure 13 Coupes histologiques sagittales montrant le LCA à 8 (a) puis 14 (b) semaines de gestation.

Dissection anatomique d'un genou fætal à 19 semaines de gestation (c), d'après F.DUBRANA.

A la 14ème semaine, toutes les structures articulaires du genou sont développées (38, 40). A cette date, on constate la présence de fibroblastes immatures alignés selon le futur axe de résistance du LCA. Ils sont déjà recouverts d'une membrane synoviale originaire de l'appareil capsulaire postérieur, ce qui en fait une structure intra articulaire et extra synoviale (42). Au cours des semaines suivantes, la vascularisation se développe sous l'effet de facteurs de croissance angiogéniques exprimés par les fibroblastes (43). Elle est assurée en proximal par une artère sagittale issue de l'artère géniculée moyenne, alors que les géniculées inférieures irriguent la partie distale. Cette branche de l'artère géniculée moyenne apparait dans l'angle supérieur entre les deux ligaments croisés, et cravate obliquement la face antérieure du LCA. Elle se distribue en un réseau très fin et peu dense dans le feuillet synovial qui recouvre le LCA. La distribution de l'irrigation est inhomogène et les zones d'insertion du ligament sont peu vascularisées (Figure 14): les vaisseaux intra ligamentaires ne traversent pas la zone cartilagineuse et l'os sous chondral ne fournit aucun apport vasculaire. Ce réseau vasculaire précaire est plus riche à l'âge fœtal qu'à l'âge adulte.

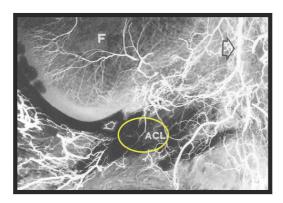


Figure 14 Faible vascularisation du LCA au niveau des zones de transition selon Scapinelli (44).

A partir de la vingtième semaine, la taille augmente sans modification de la forme. Le LCA prend son apparence adulte dès la vingt-quatrième semaine de gestation. Tena-Arregui *et al.*(45) ont réalisé une étude anatomique sur des genoux de fœtus entre 22 et 48 semaines de gestation et ont identifié deux faisceaux pour le LCA fœtal. Le LCA fœtal avait un aspect proche du LCA de l'adulte avec néanmoins des fibres ligamentaires dont l'orientation était parallèle, sans torsion. Cette constatation est partagée par Ferreti *et al.*(46) qui précisent que l'aspect en double faisceau est visible dès la 17^{ème} semaine de gestation. Ils notent la présence d'un septum séparant les deux faisceaux. Le LCA subirait ensuite une torsion de ses fibres au cours de la croissance, suivant le développement embryologique des membres inférieurs.

Le LCA est une entité biomécanique particulière.

Le LCA est le principal stabilisateur des mouvements de translation antérieure du tibia lors de la flexion du genou (47-50) et participe à la stabilité rotatoire (48, 51, 52). Le comportement du LCA est de type visco élastique ce qui lui permet de mieux résister aux activités répétitives, en diminuant continuellement la tension dans le ligament, après chaque cycle. Ce comportement limite les ruptures par fatigue. Selon Woo et al. (53), la charge ultime avant rupture du complexe fémur - LCA tibia sur des jeunes sujets anatomiques (22-35 ans) est de 2160 (± 157) Newton (N), avec une rigidité de 242 (± 28) N/mm. La même étude considérant des genoux de sujets âgés (60-97 ans) montre une diminution significative de ces deux valeurs à 658 (± 129) N pour la charge ultime et 180 (± 25) N/mm pour la rigidité. La fonction journalière habituelle produit ainsi des charges estimées à 20% de la charge nécessaire pour entraîner la rupture (54). On estime que les forces qui s'appliquent sur le LCA à la marche sont de l'ordre de 400 à 500 N. Ces forces peuvent atteindre 1700 à 1800 N lors d'accélération ou de décélération rapides (55).

Lorsque le genou est en extension, les fibres du LCA sont parallèles et apparaissent à égale et complète tension. Au fur et à mesure que le genou fléchît une laxité antérieure du genou apparait et augmente au fur et à mesure que l'angle qui est formé par le LCA et les plateaux tibiaux diminue (Figure 15). L'augmentation de cette laxité est maximale à 20° de flexion expliquant la sensibilité du test de Lachman. Ceci a été confirmé par Sbihi *et al.* (56), par une étude anatomique avec mesure de la translation antérieure (par un arthromêtre, le Rolimeter ®) avant et après section du LCA et à différents angles de flexion (Figure 16).

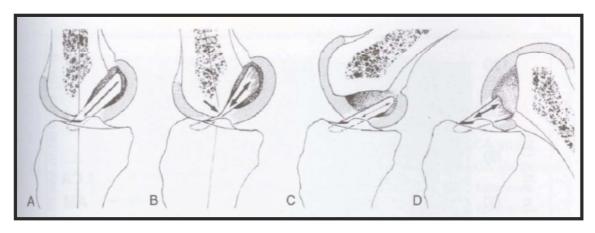


Figure 15 Direction et tension du LCA : visualisation du genou en extension (a), en hyperextension (b), en flexion (e) et en hyperflexion (d).

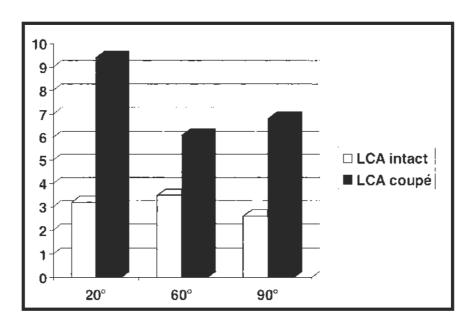


Figure 16 Translation tibiale antérieure en fonction de la flexion du genou d'après Sbihi et al. (34).

En flexion complète, et en translation tibiale postérieure, toutes les fibres du LCA sont détendues. Lors d'une translation tibiale antérieure faible, seul le bord antérieur du ligament se tend. Si on augmente la translation tibiale antérieure, le recrutement de fibres tendues augmente. Lorsque le genou est fléchi a 90°, il n'est pas possible de mettre en tension les fibres les plus postérieures, même avec une traction de 125 N (24). Lors de l'extension, l'angle formé par le LCA et les plateaux tibiaux augmente. Le LCA s'enroule sur lui-même en se verticalisant avec ses fibres postérieures qui se tendent (57). Le bord antérieur du ligament sert d'axe de rotation ou plutôt de « dérotation ». En extension complète, les fibres antérieures du LCA sont comprimées contre le toit de l'échancrure intercondylienne. Cette conception biomécanique a été affinée avec la description d'un comportement par faisceaux. *Ainsi*, la plupart des études biomécaniques récentes distinguent,

comme les études anatomiques, le faisceau antéro médial (FAM) et le faisceau postéro latéral (FPL). Ce modèle à deux faisceaux permet une meilleure description du fonctionnement du LCA et est utilisé par la majorité des auteurs. Genou fléchi, les fibres du FAM se tendent alors que les fibres du FPL se relâchent. De même, en extension, les fibres AM se relâchent partiellement et c'est au tour des fibres PL de se tendre (Figure 17).

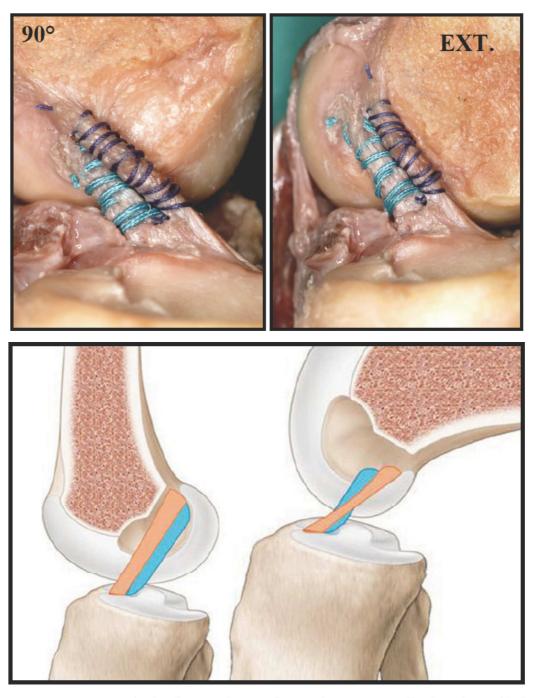


Figure 17 Comportement des deux faisceaux du LCA en flexion 90° et en extension d'après Duthon et al.(42).

La variation de longueur des deux faisceaux est donc distincte au cours du mouvement de flexionextension (58, 59). Ce modèle a notamment été confirmé par Amis *et al.* (60) dont l'étude démontre qu'aucune fibre du LCA ne reste isométrique, notion reprise par d'autres études plus récentes (11, 54, 61). Le faisceau qui se rapproche le plus de l'isométrie étant le FAM (Figure 18).

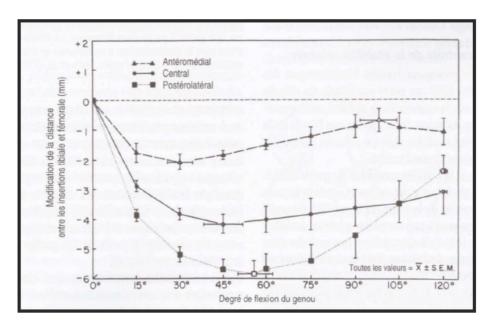


Figure 18 Variations de longueur des différents faisceaux entre 0 et 120° de flexion.

Pour Hollis et al. (58), le FAM s'accroît de 1,9 mm (5%) à 30° de flexion et de 4 mm (12%) à 90°. Inversement, le FPL décroît de 3,2 mm (14%) lorsque le genou est fléchi passivement à 30° et de 7,1 mm (32%) jusqu'à 90°. Au-delà de 90°, Amis et al. (60) ont montré que le FAM continue de s'allonger alors que le FPL se retend lorsqu'on approche la flexion complète. Selon cette même étude et contrairement à Hollis et al. (58), le FAM subirait d'abord un léger raccourcissement jusqu'à 30° de flexion avant de s'allonger graduellement jusqu'à son maximum à 120° de flexion.

La stabilité antéro postérieure est principalement sous le contrôle du FAM.

Lorsque la flexion du genou augmente, le point d'application de la force supporté par le LCA se translate au niveau du FAM (62). Ainsi, la mise en charge du FAM augmente avec la flexion, et ce phénomène s'accentue lorsqu'on applique un tiroir antérieur au tibia. Entre 0 et 45°, c'est le FPL qui subit le plus de charge, avec un maximum vers 15° de flexion. A 90° de flexion, il supporte encore 35% de la charge (63). Le FAM supporte un maximum de contrainte entre 60 et 90° de flexion, mais sa charge varie peu : elle supporte 30% de la charge du LCA en extension et 45% en flexion. Cela est du au caractère « quasi isométrique » du FAM (64), au contraire du FPL, qui est plus anisométrique. L'évolution de la charge supportée par chaque faisceau lors de la flexion du genou montre que celleci augmente régulièrement pour le FAM et diminue pour le FPL.

La stabilité rotatoire nécessite la présence des deux faisceaux mécaniques.

Lors de la mise en contrainte du genou combinant tiroir antérieur, valgus et rotation interne, le contrôle de la laxité chute considérablement par rapport à une contrainte en tiroir antérieur seule (65). Cela se traduit par une moindre mise en charge du FAM lors des sollicitations combinées. Le contrôle de la stabilité antéro postérieure et rotatoire a été comparé après reconstruction soit du FAM isolé, soit des deux faisceaux (65). Les résultats ont montré que pour un tiroir antérieur pur, la laxité antéro postérieure était significativement diminuée en extension et à 30° de flexion avec les reconstructions des deux faisceaux par rapport au FAM isolé. Ce fait est attribué au rôle du FPL en début de flexion (34). Lors des sollicitations combinées en tiroir antérieur, valgus et rotation interne, le contrôle de la laxité AP à 15 et 30° de flexion est significativement amélioré après reconstruction des deux faisceaux. Dans ces conditions de mise en charge combinée, la charge supportée par la reconstruction augmente significativement, traduisant la résistance à la sollicitation rotatoire du genou (66, 67).

Ces notions mécaniques ont conduit à développer le concept de positionnement et de reconstruction anatomiques. Le but est de respecter l'isométrie du LCA afin de rétablir une fonction du genou la proche de la normale. Un positionnement fémoral trop antérieur du transplant est l'erreur la plus fréquente et la plus dangereuse (68). Cela aboutit à une anisométrie positive. L' augmentation de la distance entre les sites d'insertion lors de la flexion, induit une mise en tension excessive de la greffe. Un positionnement trop antérieur au tibia diminue la non-isométrie mais favorise un conflit avec le toit de l'échancrure en extension. Un positionnement trop postérieur augmente la non-isométrie (69, 70). Un positionnement anatomique favorise une reconstruction isométrique, mais il n'existe pas de positionnement automatique.

De nombreuses évolutions ont été proposées récemment (reconstruction à double faisceau (71-73), apport de la navigation (74), ténodèse latérale systématique (75)). Le bénéfice est encore débattu (63, 76-79). L'objectif est un meilleur contrôle des laxités frontale et rotatoire (80), en essayant de reproduire au mieux l'anatomie du LCA. Les conceptions « *modernes* » de l'anatomie du LCA, le décrivant comme une structure à deux faisceaux (antéro médial et postéro latéral) (13, 18, 19, 27, 30), ont récemment été remises en cause. Ainsi, certains auteurs rapportent une insertion fémorale directe du LCA longue et fine (33, 81-83) (Figure 19 et 20), un corps du LCA plat et fin (32, 82, 84) (Figure 21) et une insertion tibiale du LCA en forme de « C » ou de « J » mais avec une grande variabilité anatomique (84, 85) (Figure 22).

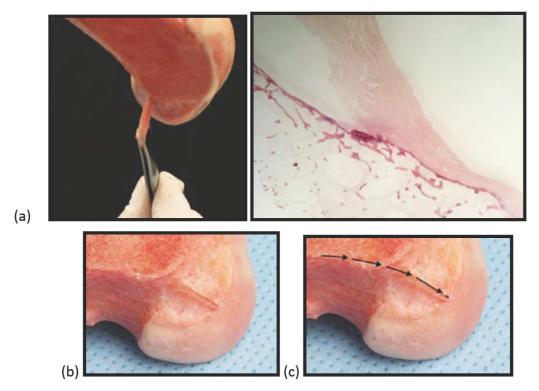


Figure 19 L'insertion fémorale du LCA est fine et en continuité directe avec la corticale postérieure. Courtesy R.Smigielski, « Ribbonlike Anatomy of the Anterior Cruciate Ligament from Its Femoral Insertion to the Midsubstance ».

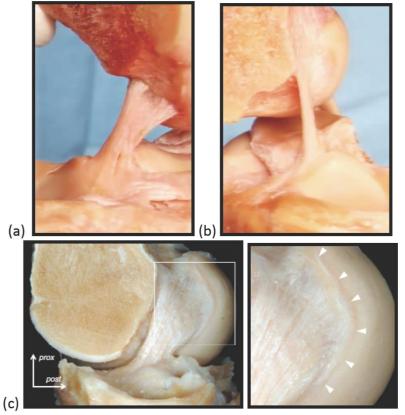


Figure 20 L'Insertion fémorale directe donne l'aspect du corps du LCA (a), et expansion postérieure sur le cartilage fémoral postérieur (b). Courtesy de R.Smigielski (83). Courtesy de Mochizuki (c) (82)

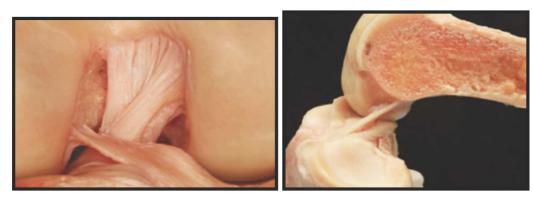


Figure 21 LCA en ruban. Photographies de R.Smigielski **« Ribbon like Anatomy of the Anterior Cruciate Ligament from Its**Femoral Insertion to the Midsubstance »

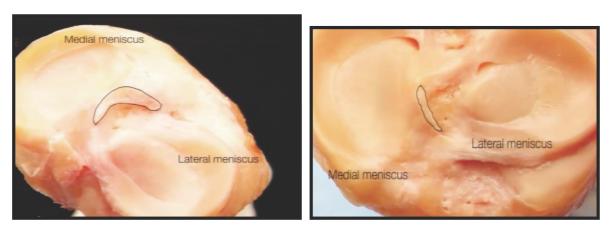


Figure 22 Insertion tibiale en forme de « C » ou de « J ». Photographies de R.Smigielski, **« Ribbonlike Anatomy of the**Anterior Cruciate Ligament from Its Femoral Insertion to the Midsubstance ».

Pour R.Smigielski et al. (85) et R.Siebold et al.(84), le LCA comporte un seul faisceau plat, étendu tel un ruban. Ce nouveau concept est à rapporter à la constatation d'un surdimensionnement du transplant par rapport au LCA natif dans les techniques dites anatomiques, tant au niveau des insertions osseuses que du corps du ligament (86). Ces nouvelles conceptions pourraient favoriser l'utilisation de transplants plats comme les transplants os—tendon—os prélevés au dépends du tendon patellaire, ou du tendon quadricipital.

Le but de notre travail a été de vérifier le travail princeps de R.Smigielski *et al* (83). Notre hypothèse était que le LCA était une structure plate en ruban.

MATERIELS ET METHODES

Ce travail a été réalisé à l'Ecole de Chirurgie de l'Assistance Publique – Hôpitaux de Paris (7 rue du Fer à Moulin 75221 Paris Cedex 5) entre novembre 2013 et mai 2014, selon un protocole de recherche validé par le comité scientifique de l'école.

Tous les genoux sans antécédents macroscopiques traumatiques ou chirurgicaux, c'est-à-dire indemnes de déformation ou de cicatrice, ont été inclus. Après arthrotomie, étaient exclus de l'étude, tous les genoux présentant une rupture partielle ou totale du LCA, une dégénérescence mucoïde du LCA, des lésions arthrosiques de l'échancrure et les genoux sièges d'une pathologie inflammatoire de la synoviale.

De façon initiale, soixante genoux de sujets anatomiques non embaumés (conservés à +4°) ont été inclus. Le temps moyen de conservation entre le décès et la dissection était de 1 mois (extrêmes : 25 à 72 jours). Trente genoux droits et trente genoux gauches de 18 femmes et 12 hommes ont étaient analysés. L'âge moyen était de 78,3 ans (62-92 ans) au moment du décès. Après arthrotomie, 42 genoux de sujets anatomiques ont étés finalement inclus dans l'étude et 18 exclus. Il s'agissait de 15 femmes et 6 hommes. L'âge moyen était de 80,6 ans (extrêmes : 62-92 ans) au moment du décès.

Pour chaque genou disséqué, les séquences de dissection étaient identiques (cf. annexes III). Les genoux étaient mis à température ambiante la veille au soir de la dissection. Le genou était abordé par voie antéro-médiale en flexion 90°. La rotule était luxée. La graisse de Hoffa retirée en préservant le ménisque latéral et le ligament inter méniscal, quand il était présent et visible. Une section de l'appareil extenseur et une désinsertion capsulo méniscale médiale et latérale permettaient un accès aisé au LCA. Après s'être assuré de son intégrité, l'aspect macroscopique du LCA était décrit (aspect de simple ou double faisceau) et son calibre central était mesuré à 1,5 cm de son insertion tibiale (en antéro postérieur et médio latéral) à 90° de flexion.

A 120° de flexion, la membrane synoviale antérieure du LCA était disséquée sous loupe chirurgicale (Carl Zeiss Meditec Oberkochen Germany®), à l'aide de lames de bistouri 11 et 15. L'excision de la synoviale était débutée à l'insertion fémorale pour s'étendre vers l'insertion tibiale (Figure 23). Une attention particulière était portée à la dissection des fibres d'insertion tibiale du LCA et à leur rapport avec la corne antérieure du ménisque latéral.



Figure 23 Dissection microchirurgicale de la membrane synoviale depuis la face médiale du condyle fémoral latéral.

Afin de préserver l'aspect du sujet anatomique (longueur du membre) et pouvoir analyser la torsion du LCA, des coupes osseuses du condyle latéral et de l'ensemble du plateau tibial étaient réalisées à la scie oscillante selon le schéma suivant (Figure 24).



Figure 24 Coupes osseuses permettant d'individualiser le condyle latéral et le plateau tibial.

La pièce de dissection individualisée comportait le condyle fémoral latéral, le plateau tibial dans son ensemble, le LCA et les deux ménisques. En mobilisant le condyle latéral, la dissection de la synoviale était poursuivie en postérieur et aux insertions fémorale et tibiale en préservant l'ensemble des fibres ligamentaires. Une aide extérieure était alors nécessaire pour maintenir les pièces osseuses et réaliser une dissection soigneuse sous loupe chirurgicale. Après ablation complète de la synoviale, il était recherché une zone de clivage intra tendineuse permettant d'individualiser différents faisceaux du LCA. Les mesures suivantes étaient alors réalisées à 90° de flexion :

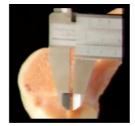
- Distance entre corne antérieure du ménisque médial et insertion tibiale antérieure,
- Distance entre corne antérieure du ménisque latéral et insertion tibiale antérieure,
- Calibre médio-latéral (largeur) du LCA à 1,5 cm de son insertion tibiale,
- Calibre antéro-postérieur (épaisseur) du LCA à 1,5 cm de son insertion tibiale,
- Angle de détorsion du LCA pour obtenir un faisceau plat, par rotation interne du condyle fémoral latéral (mesure réalisée par un goniomètre de précision +/- 1°, en vue axiale, depuis la position anatomique, jusqu'à obtention d'un « faisceau plat »)

Le LCA était ensuite sectionné à 1 mm de ses insertions fémorale et tibiale. Les mesures suivantes étaient réalisées :

- Mesure de la longueur du LCA en « faisceau plat » : longueur maximale antérieure et longueur minimale postérieure,
- Calibre médio-latéral de l'insertion tibiale du LCA,
- Calibre antéro-postérieur de l'insertion tibiale du LCA,
- Longueur de l'insertion fémorale,



Largeur de l'insertion fémorale,



- Distance entre la corticale fémorale postérieure et insertion fémorale,
- Angle de divergence entre corticale fémorale postérieure et grand axe de l'insertion fémorale.

L'ensemble des mesures a été effectué grâce à un pied à coulisse manuel millimétrique de précision 0,02 mm Wilmart ® (Wilmart ®, ZI Les portes du Nord, 62820 LIBERCOURT, France) selon le protocole de dissection (*Cf. annexes III*). Les mesures étaient répertoriées dans un tableur Excel 2010 ® (Microsoft Redmond, USA). Pour chaque temps de dissection, des photographies et des vidéos numériques ont été réalisées à l'aide d'un appareil Nikon ® Reflex D5300 (Shin-Yurakucho Bldg., 12-

1, Yurakucho 1-chome, Tokyo 100-8331, Japan). En fin de procédure, la restitution du sujet anatomique était assurée par le repositionnement de la pièce et une fermeture en un plan. L'ensemble des dissections a été réalisé par le premier auteur après validation du protocole sur deux sujets tests (quatre genoux) avec le directeur de thèse. Toutes les observations ont été confirmées par ce dernier, soit par examen direct des pièces soit par des photographies standardisées.

RESULTATS

L'ensemble des mesures effectuées est colligé (annexe IV).

Anatomie macroscopique du LCA

Dans aucun cas, nous n'avons constaté la présence d'une structure macroscopique en deux faisceaux, anatomiquement séparés, après abord articulaire et avant toute dissection, le genou fléchi à 90°.

Le calibre médio latéral (largeur) et antéro postérieur (épaisseur) du LCA avec synoviale étaient en moyenne respectivement de 9,2 mm (extrêmes : 7,6-12,5 mm) et 4,8 mm (extrêmes : 3,1-5,8 mm). Après ablation chirurgicale de la synoviale, ces valeurs étaient respectivement de 5,9 mm (extrêmes : 4-8,7 mm) et 2,7 mm (extrêmes : 2,1-3,4mm).

Sans membrane synoviale, une zone de clivage supérieur intra ligamentaire était retrouvée dans 26% des cas. Cette zone de clivage était toujours incomplète (inférieure au tiers de longueur du LCA) et non transfixiante (Figure 25).

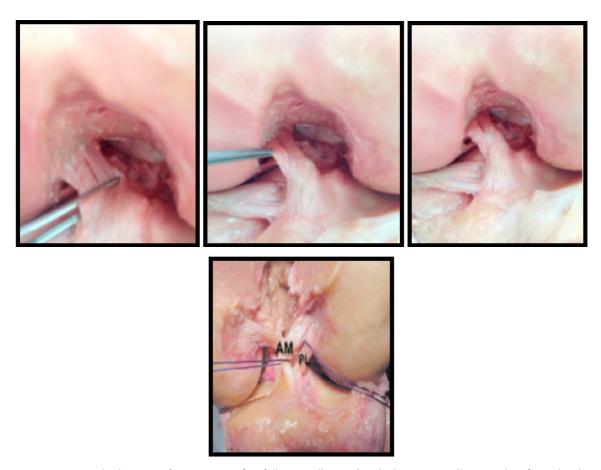


Figure 25 Zone de clivage supérieur pouvant être à l'origine d'un artifice de dissection si elle est prolongée en distal.

Pour les 42 genoux disséqués, le LCA sans synoviale était composé d'un seul faisceau, plat et fin (Figure 26).



Figure 26 Le LCA, un faisceau plat et unique.

Le LCA était plat après détorsion par mobilisation du condyle latéral en rotation interne de 83,6° (extrêmes : 72-102°) en moyenne (Figure 27).

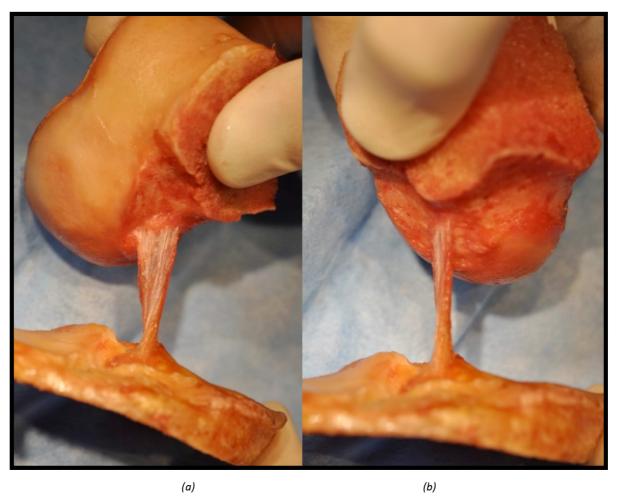


Figure 27 Avant détorsion (a) et après détorsion (b), où les fibres du LCA sont parallèles entres elles et forment un faisceau unique et plat.

Libéré de ses insertions tibiale et fémorale et après détorsion, le LCA avait une longueur moyenne de 34,8 mm (extrêmes : 28,6-43,1mm) dans son plus grand axe antérieur et 23,7 mm (extrêmes : 20,2-27,6mm) dans son plus petit axe postérieur.

Insertion Tibiale

Dans l'ensemble des cas, l'insertion tibiale du LCA était convexe en avant, arrondie dans 38% et carrée ou en « U inversé » dans 62% des cas, sans contingent postéro-latéral (Figure 28 a et b).

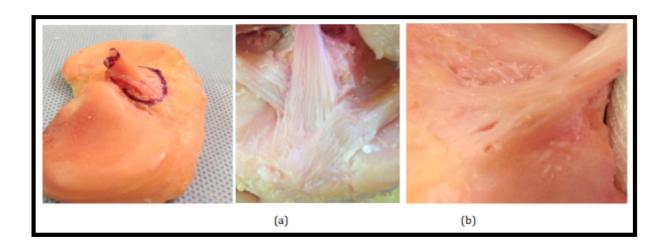


Figure 28 Insertion tibiale fine, postérieure par rapport au plateau tibial médial et à bord antérieur concave, carré (a) ou arrondie en éventail (b).

Dans le plan axial, les insertions médio latérale et antéro postérieure étaient respectivement de 11,6 mm (extrêmes : 8,9-15,1mm) et 13,9 mm (extrêmes : 9,2-17,9 mm). La partie la plus antérieure de l'insertion tibiale se situait en moyenne à 14,9 mm (extrêmes : 12,4-22mm) de la partie antérieure de l'insertion du ménisque médial. Les fibres antérieures du LCA étaient en constante relation avec la corne antérieure du ménisque latéral qui était en moyenne 2,2 mm en arrière (extrêmes : 1,2-5,1mm). Dans tous les cas, l'insertion tibiale du LCA recouvrait la corne antérieure du ménisque latéral (Figure 29).

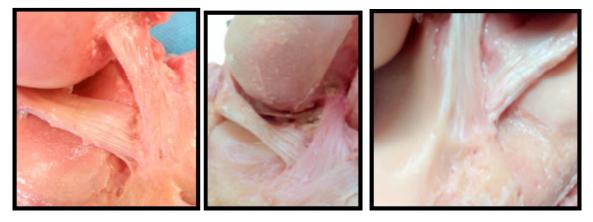


Figure 29 Le ménisque latéral est recouvert par l'insertion du LCA.

Insertion Fémorale

Le site d'insertion fémorale du LCA sur la face médiale du condyle latéral, avait une forme de virgule (Figure 30) et la partie convexe suivait le cartilage articulaire. Dans le plan sagittal, la longueur et la largeur de l'insertion fémorale étaient respectivement en moyenne de 12 mm (extrêmes : 10-13,6mm) et 3,7 mm (extrêmes : 2,6-5,1mm). La distance entre l'insertion fémorale du LCA et la corticale postérieure du fémur était en moyenne de 4,6 mm (extrêmes : 3-8mm). L'angle formé par le grand axe de l'insertion fémorale et le prolongement de la corticale postérieure était en moyenne de 25,6° (extrêmes : 16-41°).





Figure 30 Insertion fémorale en forme de virgule prolongeant la corticale postérieure.

DISCUSSION

Pour assurer la comparabilité de nos observations, nous avons réalisé ces dissections selon un protocole proche de celui de Smigielski *et al (83, 85)*. La principale limite de notre étude anatomique était l'âge moyen élevé des sujets et le sexe majoritairement féminin. Sachant qu'il existe une différence significative des mesures selon le sexe (22), nos résultats peuvent majorer le poids des mesures basses retrouvées.

Le LCA est constitué d'un seul et unique faisceau, plat.

Notre étude confirme le concept d'une structure du LCA en ruban, émise par R.Smigielski *et al.* (83) présentée initialement en 2012 lors du congrès annuel de la Société Française d'Arthroscopie (SFA) à LILLE et puis publiée en collaboration avec Siebold *et al.* en 2014 (84). Le LCA est une structure monofaisceau, plate en ruban. Le LCA a un trajet oblique en bas, en avant et en dedans. Sa forme globale est tronconique avec une base d'implantation plus large en tibial qu'en fémoral.

Ces constatations vont à l'encontre des conceptions courantes concernant l'anatomie macroscopique. Si certains auteurs décrivent une anatomie à 1 ou 3 faisceaux (20, 28, 87), la majorité, comme nous l'avons déjà souligné, proposent une description du LCA en deux faisceaux : antéro médial (AM) et postéro latéral (PL) aux caractéristiques morphométriques et fonctionnelles différentes (1, 13, 29, 60, 87-90). Cette conception à point de départ anatomique et surtout biomécanique ne correspondait dans aucun de nos cas avec l'anatomie macroscopique, que la synoviale soit présente ou absente.

Nous avons retrouvé dans 26% des cas, une zone de clivage intra ligamentaire, supérieure, de moins d'un tiers de la longueur totale du LCA. Cette zone de clivage était toujours incomplète et non transfixiante mais pouvait être à l'origine d'un artifice de dissection si elle était prolongée (18, 88). Amis et al. (60) ont décrit des difficultés de dissection pour mettre en évidence plusieurs faisceaux et soulignent que cela était plus facile en cas d'âge avancé. Amis et al. (60) suggéraient le fait que le LCA était plissé, genou en flexion, ce qui faisait croire à des interstices entre différents faisceaux et donc menait à des artifices de dissection chez ces sujets anatomiques âgés : " that the ACL wrinkles into the appearance of three bundles as the knee flexes. These bundles are often demonstrably separate structures, twisted together during flexion, but the use of the dissector to separate the fibre bundles can cross the threshold between bundles and made their creation."

Pour R.Smigielski et al. (83, 85), l'aspect en double faisceau est du à l'anatomie en ruban du LCA est majoré en flexion de genou. Amis et Dawkins font la même constatation (60). Une vue frontale du genou en flexion et avant toute dissection est source d'erreurs sur l'anatomie du LCA (Figure 31).

L'ablation de la synoviale diminuait le calibre du LCA. Nos résultats étaient comparables avec ceux de la littérature (22, 29, 32, 84, 91). Il existait en moyenne une diminution de calibre de 35% en médio latéral (largeur) et de 41% en antéro postérieur (épaisseur). Ces données confirment les conclusions de Pujol *et al.* (86) qui montrent que l'utilisation des tendons ischio-jambiers favorise un surdimensionnement de la greffe par rapport au LCA natif, qui n'est donc pas anatomique.

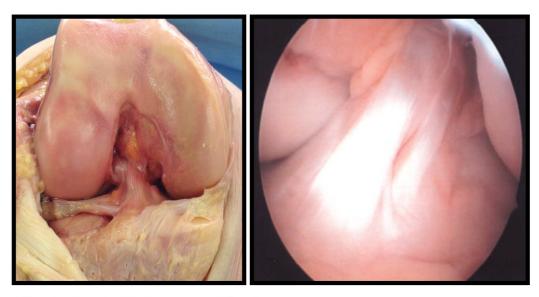


Figure 31 L'analyse frontale de l'échancrure avant dissection de la synoviale est source d'erreur. Image arthroscopique du Docteur N.LEFEVRE.



Figure 32 Aspect évocateur d'un double faisceau, puis après ablation complète de la synoviale et détorsion, mise en évidence d'un « LCA ruban ».

Les sites d'insertion tibiale et fémorale du LCA sont d'orientations différentes.

Insertion tibiale

L'insertion tibiale du LCA a fait l'objet de nombreuses études depuis les travaux d'Odensten *et al.* (28), et plus récemment la revue systématique de littérature de Kopf *et al.* (21). Siebold *et al.*(84) ont mis en évidence la variabilité de formes et le fait que ne pouvait être différencié une insertion tibiale pour chaque faisceau (AM et PL) (22). L'insertion tibiale avait dans lors de nos dissections, une forme de « C », convexe en avant, voire en « U » inversé et nous avons retrouvé un aspect morphologique carré du bord antérieur dans 62% des cas.

Il ne s'agissait pas d'une insertion pleine et arrondie mais d'une insertion fine, avec un centre dépourvue de fibres. Cette description anatomique est partagée par Siebold *et al.*(84) et Smigielski *et al.*(85) qui soulignent la grande variabilité anatomique de l'insertion tibiale. Le bord antérieur était en lien constant avec l'insertion antérieure du ménisque latéral qui se situait en moyenne 2 mm en arrière des fibres les plus antérieures. Cette insertion antérieure du ménisque latéral peut constituer selon nous un repère fiable, lors de la visée tibiale. La racine du ménisque latéral est recouverte par l'insertion tibiale du LCA (21).

Le rapport au ménisque médial est plus inconstant dans la littérature (19, 21, 22). Nous avons retrouvé une distance moyenne entre le bord antérieur du ménisque médial et le bord antérieur du LCA de 14,9 mm contre 8 mm dans la littérature (28), ce qui tend à penser que lorsque l'on utilise le compartiment médial comme référence, le risque est de placer la greffe trop antérieure. Nous n'avons pas utilisé dans cette étude la surface rétrospinale comme référence comme le préconisent Colombet *et al.*(18). Les surfaces d'insertion varient du simple au double dans la littérature (Table I) et seraient dépendantes du sexe et des dimensions de l'extrémité supérieure du tibia (22) :

- En médio-latéral, de 7,8 mm (20) à 12,7 mm (18),
- En antéro-postérieur de 14 mm (91) à 29,3 mm (13).

Dans notre série, nous avons observé une surface moyenne de 11,6 mm en médio-latéral et 13, 9 mm en antéro-postérieur, ce qui correspond à la limite inférieure des données de la littérature.

Auteurs	Nombre de sujet	Insertion médio-latérale (largeur)	Insertion antéro-postérieure (longueur)
Colombet et al.(18)	7	12,7 mm	17,6
Cuomo et al.(92)	21	9 mm	17 mm
Edwards <i>et al.</i> (30)	55	9 mm	18 mm
Girgis et al.(13)	19	Non décrite	29,3 mm
Heming <i>et al.</i> (20)	12	7, 8 mm	18,5 mm
Morgan <i>et al.</i> (93)	50	10 mm	18 mm
Muneta <i>et al.</i> (87)	16	11 mm	17 mm
Odensten <i>et al.</i> (28)	20	11 mm	17 mm
Siebold <i>et al.</i> (22)	46	10 mm	14 mm
Tallay <i>et al.</i> (94)	36	10,3 mm	19,5 mm
Notre série	42	11,6 mm	13,9 mm

Table I Tailles de l'insertion tibiale dans la littérature.

Contrairement aux affirmations de Fu *et al.*(95), les greffes utilisées pourraient ainsi reproduire la surface d'insertion tibiale du LCA natif, quelque soit le transplant utilisé. Les mesures des surfaces d'insertion sont stables quelque soit le degré de flexion/extension (13, 58).

Insertion fémorale

La restitution anatomique de la zone d'insertion fémorale est une source fréquente d'erreur (96, 97). Dans la littérature, l'insertion fémorale du LCA est décrite comme ovale, elliptique ou de forme variable (18, 30). Ses mesures sont variables comprises entre 14 mm (30) à 23 mm (13) de longueur, et de 7 mm (30) à 11 mm (28) de largeur, selon les auteurs (Table II). Dans notre étude, cette insertion était en moyenne de 12 mm de longueur et 3,7 mm de largeur, soit une insertion plus courte et plus fine que décrite dans la littérature (98) et par R.Smigielski (83).

La restitution anatomique paraît accessible à un greffon fin de type os-tendon-os. Ceci est en contradiction avec l'étude de F. Fu *et al.*(95) selon laquelle, seul le greffon de type gracile - semitendineux (DIDT) est capable de reproduire la taille de l'insertion fémorale native. L'insertion fémorale formait un axe de 25,6° degrés (extrêmes : 16°- 41°) en moyenne avec la corticale postérieure. Cet angle varie de 12° à 37° selon les auteurs (30, 91, 99, 100). Elle était positionnée en moyenne 4,6 mm en avant de la corticale postérieure, soit légèrement plus antérieure que dans le travail de Lubowitz *et al.*(98), qui la décrit 2,5 mm en avant. La corticale postérieure reste donc le référentiel lors de la fixation fémorale pour le positionnement antéro postérieur du tunnel (18) et pour la rotation (26).

La torsion du LCA

Dans l'ensemble de nos dissections, le LCA s'élargissait de fémoral en tibial avec une torsion des fibres permettant au bord antérieur du LCA d'être concave et de ne pas rentrer en conflit avec le toit de l'échancrure inter condylienne lors de l'extension complète. Cette notion de torsion est un apport nouveau par rapport aux données de R.Smigielski et al (83,85) et R.Seibold et al (84). Il nous a été en effet possible de réaliser une détorsion (rotation interne du condyle externe) qui permettait d'obtenir un aspect plat et fin du LCA rendant parallèle l'ensemble de ces fibres. Sur le plan morphologique, cette torsion est explicable par l'anatomie plate du LCA et par l'orientation opposée des surfaces d'insertion tibiale (convexe vers l'avant) et fémorale (convexe vers l'arrière). La valeur de cette torsion était de 83,6° en moyenne. Tena-Arregui et al. (45), identifiaient une structure à deux faisceaux pour le LCA fœtal, mais décrivaient des fibres ligamentaires dont l'orientation était parallèle, sans torsion. Ferretti et al.(31) ont également mis en évidence une orientation parallèle des fibres du LCA à l'état fœtal et émis l'hypothèse que la torsion du LCA suivait la torsion des membres inférieurs au cours du développement embryonnaire.

Auteurs Insertion (longueur / largeur)		Forme
Colombet et al.(18)	13,9 mm / 9,3 mm	Variable
Edwards et al.(30)	14 mm / 7 mm	Variable
Ferretti et al.(31)	17,2 mm / 9,9 mm	Semi lunaire
Heming et al.(20)	18,4 mm / 9,5 mm	Non décrite
Iwahashi <i>et al.</i> (81)	17,4 mm / 8 mm	Ovale
Luites et al.(101)	Non décrite	Ovale
Mochizuki <i>et al.</i> (32)	AM: 9,2 mm / 4,7 mm PL: 6 mm / 4,7 mm	Ovale
Purnell et al.(99)	12,9 mm / 7,6 mm	Non décrite
Siebold et al.(91)	15 mm / 8 mm	Virgule
Steckel et al.(102)	Steckel et al.(102) Non décrite	
Takahashi <i>et al.</i> (23)	Takahashi <i>et al.</i> (23) AM: 11,3 mm / 7,5 mm PL: 11 m / 7,6 mm	
Yasuda et al.(103)	Non décrite	Ovale
Notre série	12 mm / 3, 7 mm	Virgule

Table II : Taille et forme de l'insertion fémorale dans la littérature.

D'autres travaux anatomiques avaient décrit cette torsion (82, 84) sans en évaluer l'importance, et des études biomécaniques avaient suggéré une meilleure résistance à l'arrachement en effectuant une torsion de la greffe de 90° entre son insertion fémorale et tibiale (104). Cette notion de torsion nous apparaît donc importante et peut donner une impression de pseudo double faisceau par l'enroulement des fibres ligamentaires lors de l'examen initial de l'échancrure (avant dissection), à 90° de flexion (position classique de dissection). Cette notion est confirmée par d'autres auteurs (13, 60, 84). Selon Mochizuki *et al.* (82), cet aspect se majore lors de la mobilisation en flexion/extension. Par ailleurs, l'analyse macroscopique du LCA est difficile avec la membrane synoviale et le LCP en arrière (105) (Figures 31 et 32).

CONCLUSION

L'objectif de la chirurgie de reconstruction du LCA est de reproduire l'anatomie native. Cette reconstruction anatomique est définie par une reconstruction qui restaure « *le calibre du LCA, l'orientation de ses fibres de collagènes et la morphologie des insertions* » (106).

Notre travail permet de valider le travail initial de R. Smigielski *et al* (83). Le LCA est une structure anatomique à un seul faisceau, plat et en forme de ruban (Figure 33). La latéralisation est sans incidence sur les résultats observés (107).

L'insertion tibiale, en forme de « C », est moins large et plus postérieure que dans la littérature. L'insertion fémorale, en forme de virgule, prolonge la corticale postérieure. Ces insertions, fines et d'orientation différentes, expliquent à elles seules, la théorie du ruban.

Notre travail complète celui de R.Smigielski *et al* (83,85)en décrivant et mesurant la torsion des fibres du LCA entre leurs insertions fémorale et tibiale. Cette torsion, en moyenne de 83,6°, est probablement explicable par l'embryologie et un travail en cours tend à prouver cette affirmation.

Nos constatations ne soutiennent pas le caractère dit anatomique des ligamentoplasties à double faisceau. Seul un greffon plat et subissant une rotation entre ses insertions fémorale et tibiale pourrait mériter ce qualificatif. Il resterait à prouver qu'un greffon plus anatomique soit capable d'améliorer les résultats biomécaniques et fonctionnels de nos ligamentoplasties antérieures, et qu'une torsion de ses fibres permette un meilleur contrôle des rotations.

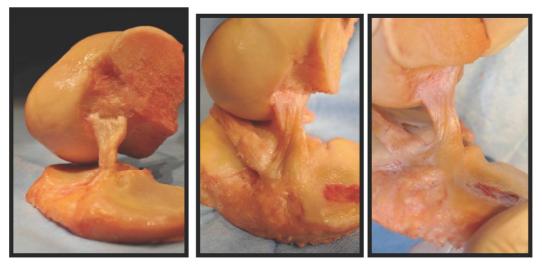


Figure 33 LCA en ruban.

ANNEXES

Annexe I Rappel historique sur l'anatomie, l'examen clinique et la thérapeutique du LCA.

ANATOMIE ET CLINIQUE



- 200 av Jc: GALIEN décrit les ligaments croisés,
- 1837: R.ADAMS décrit le premier cas de rupture du LCA,
- 1875: MOULIS* décrit le rôle du LCA dans la stabilité antéro postérieure et le teste proche de l'extension ...



- 1903: FLANSE reconstruit le LCA à l'aide de fils de soie tressés associés au demi tendineux comme prothèse ligamentaire,
 1917: HEV GROVES* reconstruit le LCA en utilisant le fascia lata,

- 1948: ATRILLAT enseigne à ses élèves l'examen clinique de la rupture du LCA. L'école Lyonnaise est né.

APRES GUERRE, L'EMULATION



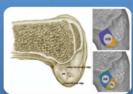
- •1963: KENNETH JONES utilise le tiers moyen de tendon rotulien qui reste pédiculé au tibia. Il n'y a pas de tunnel tibial et le tunnel fémoral est très antérieur,
- •1968: E. OREGON introduit la notion d'instabilité rotatoire,
- 1969: K.FRANKE utilise un transplant libre du TR avec deux baguettes osseuses,
- •1972: MAC INTOSH décrit le "pivot shift test",
- •1975: R.MARSCHALL met au point une prothèse ligamenatire en Dacron,
- •1975: M.LEMAIRE* réalise un plastie extra articulaire,
- •1976: TORG communique à la Nouvelle Orléans sur le test de LACHMAN, son mentor.

LA RÉVOLUTION ARTHROSCOPIQUE



- 1981: DANDY* RÉALISE LA 1ÈRE RECONSTRUCTION SOUS ARTHROSCOPIQUE
- 1983/1984: NOYES ET DEIGUR RÉALISENT UN TUNNEL FÉMORAL OUT-IN
- •1984: MOSEMBERG RÉALISE UN TUNNEL FÉMORAL IN-OUT
- •1988: GILLOUIST INVENTE LE TUNNEL BORGNE

LA RECONSTRUCTION A DOUBLE FAISCEAUX



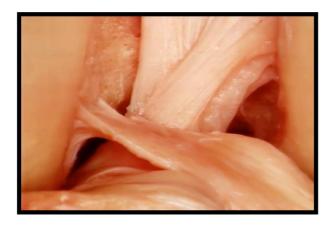
- 1973: K.VIERSTEIN réalise la première reconstruction à double faisceau du
- 1988: FRIEDRICH et O'BRIEN introduise la notion d'isométrie fonctionnelle
- 1990: F., FU* décrit l'"anatomic double bubble concept"



L'ANATOMIE EN RUBAN

- 2012: R.SMIGIELSKI* décrit le LCA comme un ruban constitué d'un seul faisceau plat
- 2014: R.SIEBOLD confirme cette théorie et précise les sites d'insertions osseuses

Protocole Anatomie du LCA, « la théorie du ruban »



«[...] La leçon d'anatomie de Rembrandt, oui, j'en suis aussi demeuré tout surpris. Te rappelles-tu les couleurs des chairs ? C'est de la terre, surtout les pieds [...]

Il y a aussi, parfois, je devrais dire toujours, un rapport d'opposition entre le ton du costume et celui du visage.»

Vincent Van Gogh à son frère Théo

«Etude anatomique du ligament croisé antérieur: théorie du ruban »

Investigateur Coordonnateur ou personne qui dirige et surveille la réalisation de la recherche :

Docteur Philippe BOISRENOULT

CH de Versailles, Hôpital MIGNOT

Méthodologiste:

Jocelyne Herruel
jherruel@ch-versailles.fr

Etablissement responsable de la recherche :

CH de Versailles Hôpital MIGNOT

Design de l'étude Structure géométrique du LCA, photographies des dissections,				
Responsable de la recherche Investigateur principal Docteur BOISRENOULT Nombre de centres prévus Un centre Etude anatomique Durée totale : 6 mois Travail sur cadavres, Travail sur cadavres, Travail sur cadavres, Anatomique, Par un seul opérateur, dissection sous loupe de 20 genoux cadavériques Par un seul opérateur, dissection sous loupe de 20 LCA, évaluation de la structure géométrique du LCA, photographies des dissections, Validation extrinsèque de la théorie de la structure en ruban du LCA ém par le Dr Smiglelski (SFA Lille 2012) et non publiée Objectifs de l'étude Objectifs secondaire(s): Mesure de la largeur du LCA en plein corps, à son insertion fémorale, à son insertion tibiale. Nombre de cas prévisionnel Calendrier des différentes visites et des différents examens Critères principaux de sélection, d'inclusion, de non inclusion et d'exclusion Dissection par un seul opérateur de 20 LCAs sur genoux cadavériques sous lou retrait de la synoviale, insertions fémorales et tibiales dégagées, identification	Titre de l'étude	Etude anatomique du LCA : « théorie du ruban »		
Nombre de centres prévus	Mots clés	Anatomie du LCA, Etude cadavérique, ruban		
Nombre de centres prévus	Responsable de la recherche	CH de VERSAILLES Hôpital MIGNOT		
Type d'étude Planning de l'étude Planning de l'étude Planning de l'étude Planning de l'étude Par un seul opérateur, dissection sous loupe de 20 genoux cadavériques Anatomique, Par un seul opérateur, dissection sous loupe de 20 LCA, évaluation de l structure géométrique du LCA, photographies des dissections, Validation extrinsèque de la théorie de la structure en ruban du LCA ém par le Dr Smigielski (SFA Lille 2012) et non publiée Objectifs de l'étude Objectif principal: Vérifier, par une étude anatomique, la théorie de Smigielski la structure en ruban du LCA Objectif(s) secondaire(s): Mesure de la largeur du LCA en plein corps, à son insertion fémorale, à son insertion tibiale. Nombre de cas prévisionnel Calendrier des différentes visites et des différents examens Critères principaux de sélection, d'inclusion, de non inclusion et d'exclusion Dissection par un seul opérateur de 20 LCAs sur genoux cadavériques sous lou retrait de la synoviale, insertions fémorales et tibiales dégagées, identification	Investigateur principal	Docteur BOISRENOULT		
Planning de l'étude Planning de l'étude Design de l'étude Par un seul opérateur, dissection sous loupe de 20 genoux cadavériques Anatomique, Par un seul opérateur, dissection sous loupe de 20 LCA, évaluation de l structure géométrique du LCA, photographies des dissections, Validation extrinsèque de la théorie de la structure en ruban du LCA ém par le Dr Smigielski (SFA Lille 2012) et non publiée Objectifs de l'étude Objectif principal: Vérifier, par une étude anatomique, la théorie de Smigielski la structure en ruban du LCA Objectif(s) secondaire(s): Mesure de la largeur du LCA en plein corps, à son insertion fémorale, à son insertion tibiale. Nombre de cas prévisionnel Calendrier des différents examens Critères principaux de sélection, d'inclusion, de non inclusion et d'exclusion Dissection par un seul opérateur de 20 LCAs sur genoux cadavériques sous lou retrait de la synoviale, Insertions fémorales et tiblales dégagées, identification	Nombre de centres prévus	Un centre		
Planning de l'étude Planning de l'étude Par un seul opérateur, dissection sous loupe de 20 genoux cadavériques Par un seul opérateur, dissection sous loupe de 20 LCA, évaluation de la structure géométrique du LCA, photographies des dissections, Validation extrinsèque de la théorie de la structure en ruban du LCA ém par le Dr Smigielski (SFA Lille 2012) et non publiée Objectifs de l'étude Objectif principal: Vérifier, par une étude anatomique, la théorie de Smigielski la structure en ruban du LCA Objectif(s) secondaire(s): Mesure de la largeur du LCA en plein corps, à son insertion fémorale, à son insertion tibiale. Nombre de cas prévisionnel Calendrier des différentes visites et des différents examens Critères principaux de sélection, d'inclusion, de non inclusion et d'exclusion Dissection par un seul opérateur de 20 LCAs sur genoux cadavériques sous lou retrait de la synoviale, insertions fémorales et tibiales dégagées, identification	Type d'étude	Etude anatomique		
Design de l'étude ♣ Anatomique, Design de l'étude ♣ Par un seul opérateur, dissection sous loupe de 20 LCA, évaluation de la structure géométrique du LCA, photographies des dissections, ♣ Validation extrinsèque de la théorie de la structure en ruban du LCA émi par le Dr Smigielski (SFA Lille 2012) et non publiée Objectifs de l'étude Objectif principal : Vérifier, par une étude anatomique, la théorie de Smigielski la structure en ruban du LCA Objectifs de l'étude Objectif(s) secondaire(s) : Mesure de la largeur du LCA en plein corps, à son insertion fémorale, à son insertion tibiale. Nombre de cas prévisionnel 20 cas Calendrier des différentes visites et des différents examens Etude anatomique Critères principaux de sélection, d'inclusion, de non inclusion et d'exclusion Inclusion : Genoux cadavériques sans cicatrices Exclusion : Pathologie de la synoviale, Rupture du LCA, Agénésie du LCA Dissection par un seul opérateur de 20 LCAs sur genoux cadavériques sous lou retrait de la synoviale, insertions fémorales et tibiales dégagées, identification		❖ Durée totale : 6 mois		
Design de l'étude ❖ Par un seul opérateur, dissection sous loupe de 20 LCA, évaluation de la structure géométrique du LCA, photographies des dissections, ❖ Validation extrinsèque de la théorie de la structure en ruban du LCA ém par le Dr Smigielski (SFA Lille 2012) et non publiée Objectifs de l'étude Objectif principal : Vérifier, par une étude anatomique, la théorie de Smigielski la structure en ruban du LCA Objectif(s) secondaire(s) : Mesure de la largeur du LCA en plein corps, à son insertion fémorale, à son insertion tibiale. Nombre de cas prévisionnel 20 cas Calendrier des différents examens Etude anatomique Critères principaux de sélection, d'inclusion, de non inclusion et d'exclusion Inclusion : Genoux cadavériques sans cicatrices Exclusion : Pathologie de la synoviale, Rupture du LCA, Agénésie du LCA Dissection par un seul opérateur de 20 LCAs sur genoux cadavériques sous lou retrait de la synoviale, insertions fémorales et tibiales dégagées, identification	Planning de l'étude	Travail sur cadavres,		
Design de l'étude ♣ Par un seul opérateur, dissection sous loupe de 20 LCA, évaluation de la structure géométrique du LCA, photographies des dissections, ♣ Validation extrinsèque de la théorie de la structure en ruban du LCA ém par le Dr Smigielski (SFA Lille 2012) et non publiée Objectifs de l'étude Objectif principal : Vérifier, par une étude anatomique, la théorie de Smigielski la structure en ruban du LCA Objectif(s) secondaire(s) : Mesure de la largeur du LCA en plein corps, à son insertion fémorale, à son insertion tibiale. Nombre de cas prévisionnel 20 cas Calendrier des différentes visites et des différentes examens Etude anatomique Critères principaux de sélection, d'inclusion, de non inclusion et d'exclusion Inclusion : Genoux cadavériques sans cicatrices Exclusion : Pathologie de la synoviale, Rupture du LCA, Agénésie du LCA Dissection par un seul opérateur de 20 LCAs sur genoux cadavériques sous lou retrait de la synoviale, insertions fémorales et tibiales dégagées, identification		Objectif initial : dissection sous loupe de 20 genoux cadavériques		
Design de l'étude structure géométrique du LCA, photographies des dissections, Validation extrinsèque de la théorie de la structure en ruban du LCA ém par le Dr Smigielski (SFA Lille 2012) et non publiée Objectifs de l'étude Objectifs de l'étude Objectifs secondaire(s): Mesure de la largeur du LCA en plein corps, à son insertion fémorale, à son insertion tibiale. Nombre de cas prévisionnel 20 cas Calendrier des différentes visites et des différents examens Critères principaux de sélection, d'inclusion, de non inclusion et d'exclusion Dissection par un seul opérateur de 20 LCAs sur genoux cadavériques sous lou retrait de la synoviale, insertions fémorales et tibiales dégagées, identification		Anatomique,		
Validation extrinsèque de la théorie de la structure en ruban du LCA ém par le Dr Smigielski (SFA Lille 2012) et non publiée Objectifs de l'étude Objectif principal : Vérifier, par une étude anatomique, la théorie de Smigielski la structure en ruban du LCA Objectifs de l'étude Objectif principal : Mesure de la largeur du LCA en plein corps, à son insertion fémorale, à son insertion tibiale. Nombre de cas prévisionnel 20 cas Calendrier des différentes visites et des différents examens Etude anatomique Critères principaux de sélection, d'inclusion, de non inclusion et d'exclusion Inclusion : Genoux cadavériques sans cicatrices Exclusion : Pathologie de la synoviale, Rupture du LCA, Agénésie du LCA Dissection par un seul opérateur de 20 LCAs sur genoux cadavériques sous lou retrait de la synoviale, insertions fémorales et tibiales dégagées, identification		Par un seul opérateur, dissection sous loupe de 20 LCA, évaluation de la		
Objectifs de l'étude Objectif(s) secondaire(s): Mesure de la largeur du LCA en plein corps, à son insertion fémorale, à son insertion tibiale. Nombre de cas prévisionnel Calendrier des différents visites et des différents examens Critères principaux de sélection, d'inclusion, de non inclusion et d'exclusion Dissection par un seul opérateur de 20 LCAs sur genoux cadavériques sous lou retrait de la synovlale, insertions fémorales et tibiales dégagées, identification	Design de l'étude	structure géométrique du LCA, photographies des dissections,		
Objectifs de l'étude Objectifs de l'étude Objectifs de l'étude Objectifs de l'étude Objectif(s) secondaire(s): Mesure de la largeur du LCA en plein corps, à son insertion fémorale, à son insertion tibiale. Nombre de cas prévisionnel Calendrier des différentes visites et des différents examens Critères principaux de sélection, d'inclusion, de non inclusion et d'exclusion Dissection par un seul opérateur de 20 LCAs sur genoux cadavériques sous lou retrait de la synoviale, insertions fémorales et tibiales dégagées, identification		❖ Validation extrinsèque de la théorie de la structure en ruban du LCA émise		
la structure en ruban du LCA Objectifs de l'étude Objectif(s) secondaire(s): Mesure de la largeur du LCA en plein corps, à son insertion fémorale, à son insertion tibiale. Nombre de cas prévisionnel 20 cas		par le Dr Smigielski (SFA Lille 2012) et non publiée		
Objectifs de l'étude Objectif(s) secondaire(s): Mesure de la largeur du LCA en plein corps, à son insertion fémorale, à son insertion tibiale. Nombre de cas prévisionnel Calendrier des différentes visites et des différents examens Critères principaux de sélection, d'inclusion, de non inclusion et d'exclusion Dissection par un seul opérateur de 20 LCAs sur genoux cadavériques sous lou retrait de la synoviale, insertions fémorales et tibiales dégagées, identification		Objectif principal: Vérifier, par une étude anatomique, la théorie de Smigielski sur		
Objectif(s) secondaire(s): Mesure de la largeur du LCA en plein corps, à son insertion fémorale, à son insertion tibiale. Nombre de cas prévisionnel Calendrier des différentes visites et des différents examens Critères principaux de sélection, d'inclusion, de non inclusion et d'exclusion Dissection par un seul opérateur de 20 LCAs sur genoux cadavériques sous lou retrait de la synoviale, insertions fémorales et tibiales dégagées, identification	Objectife de Vétude	la structure en ruban du LCA		
Nombre de cas prévisionnel 20 cas	Objectiis de l'étude	Objectif(s) secondaire(s): Mesure de la largeur du LCA en plein corps, à son		
Calendrier des différents visites et des différents Etude anatomique examens Critères principaux de sélection, d'inclusion, de non inclusion et d'exclusion Dissection par un seul opérateur de 20 LCAs sur genoux cadavériques sous lou retrait de la synoviale, insertions fémorales et tibiales dégagées, identification		insertion fémorale, à son insertion tibiale.		
visites et des différents Etude anatomique examens Inclusion: Genoux cadavériques sans cicatrices sélection, d'inclusion, de non inclusion et d'exclusion Exclusion: Pathologie de la synoviale, Rupture du LCA, Agénésie du LCA Dissection par un seul opérateur de 20 LCAs sur genoux cadavériques sous lou retrait de la synoviale, insertions fémorales et tibiales dégagées, identification	Nombre de cas prévisionnel	20 cas		
Critères principaux de sélection, d'inclusion, de non inclusion et d'exclusion Dissection par un seul opérateur de 20 LCAs sur genoux cadavériques sous lou retrait de la synoviale, insertions fémorales et tibiales dégagées, identification	visites et des différents	Etude anatomique		
Inclusion : Genoux cadavériques sans cicatrices	examens			
sélection, d'inclusion, de non inclusion et d'exclusion Exclusion: Pathologie de la synoviale, Rupture du LCA, Agénésie du LCA Dissection par un seul opérateur de 20 LCAs sur genoux cadavériques sous lou retrait de la synoviale, insertions fémorales et tibiales dégagées, identification	Critères principaux de	Inclusion : Genoux cadavériques sans cicatrices		
Dissection par un seul opérateur de 20 LCAs sur genoux cadavériques sous lou retrait de la synoviale, insertions fémorales et tibiales dégagées, identification	sélection, d'inclusion, de non			
retrait de la synoviale, insertions fémorales et tibiales dégagées, identification	inclusion et d'exclusion			
Traitement, acte, combinaison retrait de la synoviale, insertions fémorales et tibiales dégagées, identification		Dissection par un seul opérateur de 20 LCAs sur genoux cadavériques sous loupe,		
i transcinioni, detej combinatori i	Traitement, acte, combinaison d'actes à l'étude (si applicable)	retrait de la synoviale, insertions fémorales et tibiales dégagées, identification des		
deux brins		deux brins		
Evaluation visuelle de la structure en ruban du LCA,	a actes a retude (si applicable)	Evaluation visuelle de la structure en ruban du LCA,		
Photographies professionnelles du LCA ainsi disséqué en flexion à 60°, 90° et 1		Photographies professionnelles du LCA ainsi disséqué en flexion à 60°, 90° et 120°		
Véracité de la théorie du ruban (aspect en ruban du LCA après étude anatomiq	Critère de jugement principal	Véracité de la théorie du ruban (aspect en ruban du LCA après étude anatomique)		
émise par Smigielski	Critere de jugement principal	émise par Smigielski		

Temps de dissection:

Sur genou sain,

Abord para patellaire interne au bistouri lame 23,

Luxation externe de la rotule,

Ablation du Hoffa en prenant garde au ménisque externe,

Désinsertion capsulo méniscale interne et externe,

Pour une exposition aisée de l'articulation, incision prolongé sur le quadriceps en proximal et avulsion du tendon rotulien en distal si besoin,

LCA présent ? Pas de lésions dégénératives majeures ? Arthrose dans l'échancrure ?

Aspect en mono ou double faisceau?

Mesure médio latérale puis antéro postérieure du LCA avec synoviale,

Ablation du LCP, et de la synoviale qui recouvre MI et ME,

Ablation de la synoviale face antérieure du Tibia,

Analyse du rapport LCA/ME,

Mesures corne antérieure du MI → Fibres antérieures du LCA nu,

Mesures de l'insertion tibiale du LCA médio latérale et antéro postérieure,

Coupe osseuse économe,

Travail sous loupe pour ablation de la synoviale sur le LCA,

Mesure médio latérale et antéro post du LCA nu,

Mesure de l'insertion fémorale,

Analyse de la Torsion,

Section du LCA à ses insertions,

Analyse de la forme des insertions tibiales et fémorales et nouvelles mesures,

Mesure de la longueur du LCA nu, et calibrage,

Fermeture du sujet en un plan et restitution de l'anatomie du sujet cadavériques.

Validation des mesures et techniques de mesures par un observateur extérieur.

Protocole strictement identique pour chaque genou disséqué.

REFERENCES

- 1. Biau DJ, Tournoux C, Katsahian S, Schranz P, Nizard R. ACL reconstruction: a meta-analysis of functional scores. Clinical orthopaedics and related research. 2007;458:180-7.
- 2. Biau DJ, Tournoux C, Katsahian S, Schranz PJ, Nizard RS. Bone-patellar tendon-bone autografts versus hamstring autografts for reconstruction of anterior cruciate ligament: meta-analysis. BMJ. 2006;332(7548):995-1001.
- 3. Freedman KB, D'Amato MJ, Nedeff DD, Kaz A, Bach BR, Jr. Arthroscopic anterior cruciate ligament reconstruction: a metaanalysis comparing patellar tendon and hamstring tendon autografts. The American journal of sports medicine. 2003;31(1):2-11.
- 4. Ratliff AH. Ernest William Hey Groves and his contributions to orthopaedic surgery. Annals of the Royal College of Surgeons of England. 1983;65(3):203-6.
- 5. The classic. Operation for repair of the crucial ligaments Ernest W. Hey Groves, MD., F.R.C.S. Clinical orthopaedics and related research. 1980(147):4-6.
- 6. Galen. On the usefulness of the parts of the body. Clinical orthopaedics and related research. 2003(411):4-12.
- 7. Wilk RM, Richmond JC. Dacron ligament reconstruction for chronic anterior cruciate ligament insufficiency. The American journal of sports medicine. 1993;21(3):374-9; discussion 9-80.
- 8. MK L. Das Kniegelenk des Menschen. Dritter Beitrag zur vergleichenden Anatomie und Mechanik der Gelenke. Sitzungsberichte der Mathematisch-

Naturwissenschaftlichen Classe der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften. 1858;32:99-142.

- 9. Adams R. Abnormal conditions of the knee joint. Sherwood Gilbert & Piper. 1847; Vol III(Todd RB, editor):p48-78.
- 10. Groves H. Operation for the repair of cruciate ligament. Lancet. 1917;2:674-5.
- 11. Fu FH, Bennett CH, Lattermann C, Ma CB. Current trends in anterior cruciate ligament reconstruction. Part 1: Biology and biomechanics of reconstruction. The American journal of sports medicine. 1999;27(6):821-30.
- 12. Franceschi JP, Sbihi A, Champsaur P. [Arthroscopic reconstruction of the anterior cruciate ligament using double anteromedial and posterolateral bundles]. Revue de chirurgie orthopedique et reparatrice de l'appareil moteur. 2002;88(7):691-7.
- 13. Girgis FG, Marshall JL, Monajem A. The cruciate ligaments of the knee joint. Anatomical, functional and experimental analysis. Clinical orthopaedics and related research. 1975(106):216-31.
- 14. Fuss FK. Anatomy of the cruciate ligaments and their function in extension and flexion of the human knee joint. The American journal of anatomy. 1989;184(2):165-76.
- 15. Amis AA, Scammell BE. Biomechanics of intra-articular and extra-articular reconstruction of the anterior cruciate ligament. The Journal of bone and joint surgery British volume. 1993;75(5):812-7.
- 16. Norwood LA, Cross MJ. Anterior cruciate ligament: functional anatomy of its bundles in rotatory instabilities. The American journal of sports medicine. 1979;7(1):23-6.
- 17. Topliss C, Webb J. An audit of tunnel position in anterior cruciate ligament reconstruction. The Knee. 2001;8(1):59-63.
- 18. Colombet P, Robinson J, Christel P, Franceschi JP, Djian P, Bellier G, et al. Morphology of anterior cruciate ligament attachments for anatomic reconstruction: a cadaveric dissection and radiographic study. Arthroscopy: the journal of arthroscopic & related surgery: official publication of the Arthroscopy Association of North America and the International Arthroscopy Association. 2006;22(9):984-92.
- 19. Edwards A, Bull AM, Amis AA. The attachments of the anteromedial and posterolateral fibre bundles of the anterior cruciate ligament: Part 1: tibial attachment. Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA. 2007;15(12):1414-21.
- 20. Heming JF, Rand J, Steiner ME. Anatomical limitations of transtibial drilling in anterior cruciate ligament reconstruction. The American journal of sports medicine. 2007;35(10):1708-15.
- 21. Kopf S, Musahl V, Tashman S, Szczodry M, Shen W, Fu FH. A systematic review of the femoral origin and tibial insertion morphology of the ACL. Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA. 2009;17(3):213-9.
- 22. Siebold R, Ellert T, Metz S, Metz J. Tibial insertions of the anteriomedial and posterolateral bundles of the anterior cruciate ligament: morphometry, arthroscopic landmarks, and orientation model for bone tunnel placement. Arthroscopy: the journal of arthroscopic & related surgery: official publication of the Arthroscopy Association of North America and the International Arthroscopy Association. 2008;24(2):154-61.
- 23. Takahashi M, Doi M, Abe M, Suzuki D, Nagano A. Anatomical study of the femoral and tibial insertions of the anteromedial and posterolateral bundles of human anterior cruciate ligament. The American journal of sports medicine. 2006;34(5):787-92.

- 24. Friedrich. Anatomie fonctionnelle du pivot central du genou. Eds Pathologie ligamentaire du genou. 2004(Springer):p 1-44.
- 25. Christel P. [Anterior eruciate ligament and rotation stability]. Revue de chirurgie orthopedique et reparatrice de l'appareil moteur. 2005;91(S8):18-22.
- 26. Amis AA, Jakob RP. Anterior cruciate ligament graft positioning, tensioning and twisting. Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA. 1998;6 Suppl 1:S2-12.
- 27. Harner CD, Baek GH, Vogrin TM, Carlin GJ, Kashiwaguchi S, Woo SL. Quantitative analysis of human cruciate ligament insertions. Arthroscopy: the journal of arthroscopic & related surgery: official publication of the Arthroscopy Association of North America and the International Arthroscopy Association. 1999;15(7):741-9.
- 28. Odensten M, Gillquist J. Functional anatomy of the anterior cruciate ligament and a rationale for reconstruction. The Journal of bone and joint surgery American volume. 1985;67(2):257-62.
- 29. Bicer EK, Lustig S, Servien E, Selmi TA, Neyret P. Current knowledge in the anatomy of the human anterior cruciate ligament. Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA. 2010;18(8):1075-84.
- 30. Edwards A, Bull AM, Amis AA. The attachments of the anteromedial and posterolateral fibre bundles of the anterior cruciate ligament. Part 2: femoral attachment. Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA. 2008;16(1):29-36.
- 31. Ferretti M, Ekdahl M, Shen W, Fu FH. Osseous landmarks of the femoral attachment of the anterior cruciate ligament: an anatomic study. Arthroscopy: the journal of arthroscopic & related surgery: official publication of the Arthroscopy Association of North America and the International Arthroscopy Association. 2007;23(11):1218-25.
- 32. Mochizuki T, Muneta T, Nagase T, Shirasawa S, Akita KI, Sekiya I. Cadaveric knee observation study for describing anatomic femoral tunnel placement for two-bundle anterior cruciate ligament reconstruction. Arthroscopy: the journal of arthroscopic & related surgery: official publication of the Arthroscopy Association of North America and the International Arthroscopy Association. 2006;22(4):356-61.
- 33. Sasaki N, Ishibashi Y, Tsuda E, Yamamoto Y, Maeda S, Mizukami H, et al. The femoral insertion of the anterior cruciate ligament: discrepancy between macroscopic and histological observations. Arthroscopy: the journal of arthroscopic & related surgery: official publication of the Arthroscopy Association of North America and the International Arthroscopy Association. 2012;28(8):1135-46.
- 34. Sbihi A, Franceschi JP, Christel P, Colombet P, Djian P, Bellier G. [Anterior cruciate ligament reconstruction: biomechanical comparison on cadaver specimens using a single or double hamstring technique]. Revue de chirurgie orthopedique et reparatrice de l'appareil moteur. 2004;90(7):643-50.
- 35. Fu FH, Jordan SS. The lateral intercondylar ridge--a key to anatomic anterior cruciate ligament reconstruction. The Journal of bone and joint surgery American volume. 2007;89(10):2103-4.
- 36. Gardner E, O'Rahilly R. The early development of the knee joint in staged human embryos. Journal of anatomy. 1968;102(Pt 2):289-99.
- 37. Haines RW. The early development of the femoro-tibial and tibio-fibular joints. Journal of anatomy. 1953;87(2):192-206.
- 38. Merida-Velasco JA, Sanchez-Montesinos I, Espin-Ferra J, Rodriguez-Vazquez JF, Merida-Velasco JR, Jimenez-Collado J. Development of the human knee joint. The Anatomical record. 1997;248(2):269-78.
- 39. O'Rahilly R. The early prenatal development of the human knee joint. Journal of anatomy. 1951;85(2):166-70.
- 40. Ratajczak W. Early development of the cruciate ligaments in staged human embryos. Folia morphologica. 2000;59(4):285-90.
- 41. Petersen W, Tillmann B. [Anatomy and function of the anterior cruciate ligament]. Der Orthopade. 2002;31(8):710-8.
- 42. Duthon VB, Barea C, Abrassart S, Fasel JH, Fritschy D, Menetrey J. Anatomy of the anterior cruciate ligament. Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA. 2006;14(3):204-13.
- 43. Petersen W, Unterhauser F, Pufe T, Zantop T, Sudkamp NP, Weiler A. The angiogenic peptide vascular endothelial growth factor (VEGF) is expressed during the remodeling of free tendon grafts in sheep. Archives of orthopaedic and trauma surgery. 2003;123(4):168-74.
- 44. Scapinelli R. Vascular anatomy of the human cruciate ligaments and surrounding structures. Clinical anatomy. 1997;10(3):151-62.
- 45. Tena-Arregui J, Barrio-Asensio C, Viejo-Tirado F, Puerta-Fonolla J, Murillo-Gonzalez J. Arthroscopic study of the knee joint in fetuses. Arthroscopy: the journal of arthroscopic & related surgery: official publication of the Arthroscopy Association of North America and the International Arthroscopy Association. 2003;19(8):862-8.
- 46. Ferretti M, Levicoff EA, Macpherson TA, Moreland MS, Cohen M, Fu FH. The fetal anterior cruciate ligament: an anatomic and histologic study. Arthroscopy: the journal of arthroscopic & related surgery: official

publication of the Arthroscopy Association of North America and the International Arthroscopy Association. 2007;23(3):278-83.

- 47. Butler DL, Noyes FR, Grood ES. Ligamentous restraints to anterior-posterior drawer in the human knee. A biomechanical study. The Journal of bone and joint surgery American volume. 1980;62(2):259-70.
- 48. Markolf KL, Mensch JS, Amstutz HC. Stiffness and laxity of the knee--the contributions of the supporting structures. A quantitative in vitro study. The Journal of bone and joint surgery American volume. 1976;58(5):583-94.
- 49. Piziali RL, Seering WP, Nagel DA, Schurman DJ. The function of the primary ligaments of the knee in anterior-posterior and medial-lateral motions. Journal of biomechanics. 1980;13(9):777-84.
- 50. Takai S, Woo SL, Livesay GA, Adams DJ, Fu FH. Determination of the in situ loads on the human anterior cruciate ligament. Journal of orthopaedic research: official publication of the Orthopaedic Research Society. 1993;11(5):686-95.
- 51. Ostgaard SE, Helmig P, Nielsen S, Hvid I. Anterolateral instability in the anterior cruciate ligament deficient knee. A cadaver study. Acta orthopaedica Scandinavica. 1991;62(1):4-8.
- 52. Shoemaker SC, Markolf KL. Effects of joint load on the stiffness and laxity of ligament-deficient knees. An in vitro study of the anterior cruciate and medial collateral ligaments. The Journal of bone and joint surgery American volume. 1985;67(1):136-46.
- 53. Woo SL, Hollis JM, Adams DJ, Lyon RM, Takai S. Tensile properties of the human femur-anterior cruciate ligament-tibia complex. The effects of specimen age and orientation. The American journal of sports medicine. 1991;19(3):217-25.
- 54. Frank CB, Jackson DW. The science of reconstruction of the anterior cruciate ligament. The Journal of bone and joint surgery American volume. 1997;79(10):1556-76.
- 55. Butler DL, Grood ES, Noyes FR, Sodd AN. On the interpretation of our anterior cruciate ligament data. Clinical orthopaedics and related research. 1985(196):26-34.
- 56. Sbihi A. Comparaison biomecanique de la reconstruction

du ligament croise anterieur par greffe de

tendons de la patte-d'oie it un ou deux faisceaux. Une

etude cadaverique. Revue de chirurgie orthopedique et reparatrice de l'appareil moteur. 2004;90:643-50.

- 57. Bousquet G. Le genou statique. Medsi/McGraw-Hill. 1991:12-6.
- 58. Hollis JM, Takai S, Adams DJ, Horibe S, Woo SL. The effects of knee motion and external loading on the length of the anterior cruciate ligament (ACL): a kinematic study. J Biomech Eng. 1991;113(2):208-14.
- 59. Dorlot JM, Christel P, Witvoet J, Sedel L. [Displacement of cruciate ligament insertions during flexion of the normal knee]. Revue de chirurgie orthopedique et reparatrice de l'appareil moteur. 1984;70 Suppl 2:50-3.
- 60. Amis AA, Dawkins GP. Functional anatomy of the anterior cruciate ligament. Fibre bundle actions related to ligament replacements and injuries. The Journal of bone and joint surgery British volume. 1991;73(2):260-7.
- 61. Fu FH, Bennett CH, Ma CB, Menetrey J, Lattermann C. Current trends in anterior cruciate ligament reconstruction. Part II. Operative procedures and clinical correlations. The American journal of sports medicine. 2000;28(1):124-30.
- 62. Livesay GA, Rudy TW, Woo SL, Runco TJ, Sakane M, Li G, et al. Evaluation of the effect of joint constraints on the in situ force distribution in the anterior cruciate ligament. Journal of orthopaedic research: official publication of the Orthopaedic Research Society. 1997;15(2):278-84.
- 63. Sakane M, Fox RJ, Woo SL, Livesay GA, Li G, Fu FH. In situ forces in the anterior cruciate ligament and its bundles in response to anterior tibial loads. Journal of orthopaedic research: official publication of the Orthopaedic Research Society. 1997;15(2):285-93.
- 64. Fleming B, Beynnon BD, Johnson RJ, McLeod WD, Pope MH. Isometric versus tension measurements. A comparison for the reconstruction of the anterior cruciate ligament. The American journal of sports medicine. 1993;21(1):82-8.
- 65. Yagi M, Wong EK, Kanamori A, Debski RE, Fu FH, Woo SL. Biomechanical analysis of an anatomic anterior cruciate ligament reconstruction. The American journal of sports medicine. 2002;30(5):660-6.
- 66. Bull AM, Earnshaw PH, Smith A, Katchburian MV, Hassan AN, Amis AA. Intraoperative measurement of knee kinematics in reconstruction of the anterior cruciate ligament. The Journal of bone and joint surgery British volume. 2002;84(7):1075-81.
- 67. Kurz MJ, Stergiou N, Buzzi UH, Georgoulis AD. The effect of anterior cruciate ligament reconstruction on lower extremity relative phase dynamics during walking and running. Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA. 2005;13(2):107-15.
- 68. Good L, Gillquist J. The value of intraoperative isometry measurements in anterior cruciate ligament reconstruction: an in vivo correlation between substitute tension and length change. Arthroscopy: the journal of arthroscopic & related surgery: official publication of the Arthroscopy Association of North America and the International Arthroscopy Association. 1993;9(5):525-32.

- 69. Howell SM, Clark JA. Tibial tunnel placement in anterior cruciate ligament reconstructions and graft impingement. Clinical orthopaedics and related research. 1992(283):187-95.
- 70. Jackson DW, Gasser SI. Tibial tunnel placement in ACL reconstruction. Arthroscopy: the journal of arthroscopic & related surgery: official publication of the Arthroscopy Association of North America and the International Arthroscopy Association. 1994;10(2):124-31.
- 71. Bellier G, Christel P, Colombet P, Djian P, Franceschi JP, Sbihi A. Double-stranded hamstring graft for anterior cruciate ligament reconstruction. Arthroscopy: the journal of arthroscopic & related surgery: official publication of the Arthroscopy Association of North America and the International Arthroscopy Association. 2004;20(8):890-4.
- 72. Zantop T, Petersen W, Sekiya JK, Musahl V, Fu FH. Anterior cruciate ligament anatomy and function relating to anatomical reconstruction. Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA. 2006;14(10):982-92.
- 73. Muneta T, Sekiya I, Yagishita K, Ogiuchi T, Yamamoto H, Shinomiya K. Two-bundle reconstruction of the anterior cruciate ligament using semitendinosus tendon with endobuttons: operative technique and preliminary results. Arthroscopy: the journal of arthroscopic & related surgery: official publication of the Arthroscopy Association of North America and the International Arthroscopy Association. 1999;15(6):618-24.
- 74. Plaweski S, Rossi J, Merloz P, Julliard R. Analysis of anatomic positioning in computer-assisted and conventional anterior cruciate ligament reconstruction. Orthopaedics & traumatology, surgery & research: OTSR. 2011;97(6 Suppl):S80-5.
- 75. Noyes FR, Barber SD. The effect of an extra-articular procedure on allograft reconstructions for chronic ruptures of the anterior cruciate ligament. The Journal of bone and joint surgery American volume. 1991;73(6):882-92.
- 76. Petersen W, Tretow H, Weimann A, Herbort M, Fu FH, Raschke M, et al. Biomechanical evaluation of two techniques for double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction: one tibial tunnel versus two tibial tunnels. The American journal of sports medicine. 2007;35(2):228-34.
- 77. Fu FH, Shen W, Starman JS, Okeke N, Irrgang JJ. Primary anatomic double-bundle anterior cruciate ligament reconstruction: a preliminary 2-year prospective study. The American journal of sports medicine. 2008;36(7):1263-74.
- 78. Siebold R, Dehler C, Ellert T. Prospective randomized comparison of double-bundle versus single-bundle anterior cruciate ligament reconstruction. Arthroscopy: the journal of arthroscopic & related surgery: official publication of the Arthroscopy Association of North America and the International Arthroscopy Association. 2008;24(2):137-45.
- 79. Noyes FR. The function of the human anterior cruciate ligament and analysis of single- and double-bundle graft reconstructions. Sports Health. 2009;1(1):66-75.
- 80. Andriacchi TP, Briant PL, Bevill SL, Koo S. Rotational changes at the knee after ACL injury cause cartilage thinning. Clinical orthopaedics and related research. 2006;442:39-44.
- 81. Iwahashi T, Shino K, Nakata K, Otsubo H, Suzuki T, Amano H, et al. Direct anterior cruciate ligament insertion to the femur assessed by histology and 3-dimensional volume-rendered computed tomography. Arthroscopy: the journal of arthroscopic & related surgery: official publication of the Arthroscopy Association of North America and the International Arthroscopy Association. 2010;26(9 Suppl):S13-20.
- 82. Mochizuki T, Fujishiro H, Nimura A, Mahakkanukrauh P, Yasuda K, Muneta T, et al. Anatomic and histologic analysis of the mid-substance and fan-like extension fibres of the anterior cruciate ligament during knee motion, with special reference to the femoral attachment. Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA. 2014;22(2):336-44.
- 83. Smigielski R, Zdanowicz U, Drwiega M, Ciszek B, Ciszkowska-Lyson B, Siebold R. Ribbon like appearance of the midsubstance fibres of the anterior cruciate ligament close to its femoral insertion site: a cadaveric study including 111 knees. Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA, 2014.
- 84. Rainer S, Peter S, Francis F, Robert S, Christian F, Axel B, et al. Flat midsubstance of the anterior cruciate ligament with tibial "C"-shaped insertion site. Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA. 2014.
- 85. Smigielski. Variations of the tibial insertion of the anterior cruciate ligament: An Anatomical Study. Anterior cruciate ligament Reconstruction. 2014;I:pp 29-32.
- 86. Pujol N, Queinnec S, Boisrenoult P, Maqdes A, Beaufils P. Anatomy of the anterior cruciate ligament related to hamstring tendon grafts. A cadaveric study. The Knee. 2013;20(6):511-4.
- 87. Muneta T, Takakuda K, Yamamoto H. Intercondylar notch width and its relation to the configuration and cross-sectional area of the anterior cruciate ligament. A cadaveric knee study. The American journal of sports medicine. 1997;25(1):69-72.
- 88. Arnoczky SP. Anatomy of the anterior cruciate ligament. Clinical orthopaedics and related research. 1983(172):19-25.

- 89. Strocchi R, de Pasquale V, Gubellini P, Facchini A, Marcacci M, Buda R, et al. The human anterior cruciate ligament: histological and ultrastructural observations. Journal of anatomy. 1992;180 (Pt 3):515-9.
- 90. Bellier G, Djian P, Christel P. Reconstruction a double faisceaux du LCA avec un transplant d'ischio jambiers/Resultats a 18 mois d'une etude prospective. Revue de chirurgie orthopedique et reparatrice de l'appareil moteur. 2005;91(S8):74.
- 91. Siebold R, Ellert T, Metz S, Metz J. Femoral insertions of the anteromedial and posterolateral bundles of the anterior cruciate ligament: morphometry and arthroscopic orientation models for double-bundle bone tunnel placement--a cadaver study. Arthroscopy: the journal of arthroscopic & related surgery: official publication of the Arthroscopy Association of North America and the International Arthroscopy Association. 2008;24(5):585-92.
- 92. Cuomo P, Edwards A, Giron F, Bull AM, Amis AA, Aglietti P. Validation of the 65 degrees Howell guide for anterior cruciate ligament reconstruction. Arthroscopy: the journal of arthroscopic & related surgery: official publication of the Arthroscopy Association of North America and the International Arthroscopy Association. 2006;22(1):70-5.
- 93. Morgan CD, Kalman VR, Grawl DM. Definitive landmarks for reproducible tibial tunnel placement in anterior cruciate ligament reconstruction. Arthroscopy: the journal of arthroscopic & related surgery: official publication of the Arthroscopy Association of North America and the International Arthroscopy Association. 1995;11(3):275-88.
- 94. Tallay A, Lim MH, Bartlett J. Anatomical study of the human anterior cruciate ligament stump's tibial insertion footprint. Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA. 2008;16(8):741-6.
- 95. Iriuchishima T, Shirakura K, Yorifuji H, Aizawa S, Fu FH. Size comparison of ACL footprint and reconstructed auto graft. Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA. 2013;21(4):797-803.
- 96. Harner CD, Giffin JR, Dunteman RC, Annunziata CC, Friedman MJ. Evaluation and treatment of recurrent instability after anterior cruciate ligament reconstruction. Instr Course Lect. 2001;50:463-74.
- 97. Kamath GV, Redfern JC, Greis PE, Burks RT. Revision anterior cruciate ligament reconstruction. The American journal of sports medicine. 2011;39(1):199-217.
- 98. Piefer JW, Pflugner TR, Hwang MD, Lubowitz JH. Anterior cruciate ligament femoral footprint anatomy: systematic review of the 21st century literature. Arthroscopy: the journal of arthroscopic & related surgery: official publication of the Arthroscopy Association of North America and the International Arthroscopy Association. 2012;28(6):872-81.
- 99. Purnell ML, Larson AI, Clancy W. Anterior cruciate ligament insertions on the tibia and femur and their relationships to critical bony landmarks using high-resolution volume-rendering computed tomography. The American journal of sports medicine. 2008;36(11):2083-90.
- 100. Shino K, Suzuki T, Iwahashi T, Mae T, Nakamura N, Nakata K, et al. The resident's ridge as an arthroscopic landmark for anatomical femoral tunnel drilling in ACL reconstruction. Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA. 2010;18(9):1164-8.
- 101. Luites JW, Wymenga AB, Blankevoort L, Kooloos JG. Description of the attachment geometry of the anteromedial and posterolateral bundles of the ACL from arthroscopic perspective for anatomical tunnel placement. Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA. 2007;15(12):1422-31.
- 102. Steckel H, Musahl V, Fu FH. The femoral insertions of the anteromedial and posterolateral bundles of the anterior cruciate ligament: a radiographic evaluation. Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA. 2010;18(1):52-5.
- 103. Yasuda K, Kondo E, Ichiyama H, Kitamura N, Tanabe Y, Tohyama H, et al. Anatomic reconstruction of the anteromedial and posterolateral bundles of the anterior cruciate ligament using hamstring tendon grafts. Arthroscopy: the journal of arthroscopic & related surgery: official publication of the Arthroscopy Association of North America and the International Arthroscopy Association. 2004;20(10):1015-25.
- 104. Cooper DE. Biomechanical properties of the central third patellar tendon graft: effect of rotation. Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA. 1998;6 Suppl 1:S16-9.
- 105. Steckel H, Fu FH, Baums MH, Klinger HM. Arthroscopic evaluation of the ACL double bundle structure. Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA. 2009;17(7):782-5.
- 106. Fu FH, Karlsson J. A long journey to be anatomic. Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA. 2010;18(9):1151-3.
- 107. Dargel J, Pohl P, Tzikaras P, Koebke J. Morphometric side-to-side differences in human cruciate ligament insertions. Surg Radiol Anat. 2006;28(4):398-402.

NOM: NOAILLES PRENOM: THIBAUT

Titre de thèse: ANATOMIE EN RUBAN DU LIGAMENT CROISE ANTERIEUR

RESUME

Introduction - Objectif:

Malgré l'apport d'études récentes, l'anatomie du ligament croisé antérieur (LCA) reste un sujet de controverse. La description, la plus communément admise, est celle d'une structure ligamentaire à deux faisceaux. Néanmoins, certains auteurs proposent des descriptions à un ou trois faisceaux. R.Smigielski *et al*, ont proposé en 2012 une nouvelle conception, celle d'une structure en ruban du LCA. Le but de notre étude anatomique était de vérifier la pertinence de cette théorie et d'analyser la torsion des fibres du LCA par rapport à ses insertions fémorale et tibiale.

Matériel et Méthodes :

Soixante genoux de sujets anatomiques frais, non embaumés, ont été disséqués par un opérateur indépendant selon un protocole unique de dissection sous loupe chirurgicale. Après ablation de la seule membrane synoviale, la morphologie des fibres ligamentaires du LCA et la torsion étaient analysées. Les zones d'insertions osseuses tibiale et fémorale ont été étudiées en terme de forme, taille et rapport anatomique.

Résultats :

Dix huit genoux ont été exclus, en raison soit d'un LCA absent soit de la présence d'une arthrose évoluée rendant l'étude de l'échancrure impossible. L'anatomie macroscopique du LCA comportait dans tous les cas, un unique faisceau plat. Aucune structure à double faisceau n'a pu être mise en évidence. Genou à 90° de flexion, il existait une torsion externe des fibres de 83,6° en moyenne (72-102), de l'insertion tibiale à l'insertion fémorale. Après détorsion, ces fibres étaient strictement parallèles entres elles et le corps du LCA était plat. Les zones d'insertions fémorale et tibiale se faisaient selon deux lignes obliques de moindre dimension par rapport aux zones repères habituellement proposées et d'orientations différentes.

Discussion:

Notre travail confirme le travail princeps de R.Smigielski *et al.* Le LCA est une structure monofaisceau en ruban. C'est la torsion des fibres, liée à la position relative des insertions osseuses, qui donne au LCA l'aspect d'une structure à double faisceau en position anatomique. Les techniques de reconstruction à double faisceau du LCA conduisent à un transplant en moyenne 20% plus épais en son corps que le LCA natif et ne respectent pas les zones d'insertion. Ces techniques ne peuvent donc pas être qualifiées d'anatomiques.

MOTS-CLES

LIGAMENT CROISE ANTERIEUR; ANATOMIE; RUBAN; INSERTIONS FEMORALES ET TIBIALES

RIBBON LIKE APPEARANCE OF THE MIDSUBSTANCE OF ANTERIOR CRUCIATE

LIGAMENT

ABSTRACT

Introduction-Purpose

Anatomy of the anterior cruciate ligament (ACL) remains controversial. Some authors describe a

single bundle while others visualize three separate bundles constituting the ACL. On the other hand,

the double bundle ACL anatomical description remains the most accepted and used nowadays. In

2012, Smigielski et al. proposed a new anatomical concept: the ribbon-like structure of the ACL. The

aim of this anatomical study was to verify this ribbon-like structure ACL description and analyze the

torsion of the ACL fibers.

Material and Method

Sixty fresh cadaveric knees were dissected by two surgeons, according to an identique and

predetermined protocol using a precise microsurgical dissection technique. After complete excision

of the synovial membrane surrounding the ACL, the morphology of the ligamentous fibers, their

femoral and tibial insertion and their torsion were measured. The femoral and tibial bony insertion

were closely studied to determine their form, size and relationship to one another.

Results

Ten knees were excluded because of an absent ACL or severe osteoarthritis rendering the inter-

condylar notch unusable. The macroscopic anatomy of the ACL was the same in all-remaining cases:

ACL formed a flat ribbon-like structure with only one bundle. None of the dissected ACL ligaments

were found to have two bundles. With the knee at 90 degrees of flexion, an average ACL torsion of

74 degrees (66-92) was noted in relationship with its femoral and tibial insertion. After derotation, all

ACL fibers became parallel. The femoral and tibial insertion zones were found to form two oblique

lines with much smaller dimensions in regard to the previously proposed larger insertion zones.

Discussion

Our work confirms the original work published by Smigielski et al. A single ribbon-like structure

bundle forms the ACL. The ACL torsion, due to its femoral and tibial insertions, gives birth to this

double bundle illusion in 90 degrees knee flexion. The oblique line insertions easily explain the

torsion of the ACL fibers at 90 degrees knee flexion. Double-bundle ACL reconstruction techniques

therefore produce a transplant that is on average 20% thicker at mid-distance with non-anatomical

insertions. Double-bundle ACL reconstruction techniques could not be therefore labelled anatomical.

Key Words: Anterior cruciate ligament (ACL), Anatomy, Ribbon,

52