# UNIVERSITE DE NANTES

### FACULTE DE MEDECINE

Année : 2018

**N°** 2018-166

#### THESE

pour le

#### **DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN MEDECINE**

Spécialité : DES de chirurgie générale

par

Cyrille DECANTE né le 19 septembre 1988 à Nantes

Présentée et soutenue publiquement le 18 octobre 2018

## **VASCULARISATION MÉNISCALE :**

## ÉTUDE ANATOMIQUE, HISTOLOGIQUE ET MICROTOMODENSITOMÉTRIQUE

- Président :Monsieur le Professeur Franck CHOTELDirecteur de thèse :Monsieur le Professeur Antoine HAMEL
- Membres du jury : Monsieur le Professeur Marc-David LECLAIR Monsieur le Docteur Loïc GEFFROY

# Serment d'Híppocrate

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 donneraí mes soíns à l'indígent 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 feraí tout pour soulager les souffrances. Je ne prolongeraí pas abusívement les agoníes. Je ne provoqueraí jamaís 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.

## Remerciements :

# À Monsieur le Professeur Franck CHOTEL, pour me faire l'honneur de présider cette thèse.

Votre passion pour la chirurgie de l'enfant et vos qualités pédagogiques m'ont laissé admiratif. Ces 6 mois passés à vos cotés m'ont énormément apporté, de mes débuts en arthroscopie jusqu'à cet adoubement. Soyez assuré de ma profonde reconnaissance.

# À Monsieur le Professeur Antoine HAMEL, pour avoir accepté de diriger cette thèse.

Merci de m'avoir guidé pendant ces années et pendant ce travail. Votre rigueur n'a d'égal que votre adresse chirurgicale. Me permettre de continuer à travailler à vos cotés, que ce soit en chirurgie ou en anatomie, est un honneur. J'aimerais un jour en savoir autant. Veuillez trouver ici le témoignage de mon profond respect et de mon admiration.

# À Monsieur le Professeur Marc-David LECLAIR, pour avoir accepté d'être membre du jury de cette thèse.

Vous me faites l'honneur de votre intérêt pour ce travail et je vous en suis très reconnaissant. Merci de me permettre de travailler dans votre service. Je serai à la hauteur. Veuillez croire en ma grande considération.

# À Monsieur le Docteur Loïc GEFFROY, pour avoir accepté d'être membre du jury de cette thèse.

Merci pour l'intérêt que tu portes à ce travail et pour tout ce que tu m'as apporté durant mon internat. Ta bienveillance est pour moi un exemple et si j'arrive un jour à ton niveau d'expertise chirurgicale, alors j'aurai réussi. J'espère pouvoir continuer d'échanger et de travailler ensemble. Trouve ici le témoignage de mon admiration. À l'ensemble des étudiants en Master d'Anatomie ayant travaillés sur les ménisques depuis 2015 : Louis-Marie SAUVAGE, Corentin BERTOUT, Lucie GILBERT, Jean-Brice PACAUD, Tahar GHANNAM, Pauline GIRAUD, Yassine RHALLABI, Clément MEDEAU, Annabelle GASTINEAU, Suzanne REINEKE, Marie ARNAUD, Roxane GILET. Vous avez permis d'étoffer ce travail grâce à la qualité de vos dissections. Je vous remercie de m'avoir considéré, de m'avoir écouté et d'avoir su répondre à mes demandes.

#### À Julie LESOEUR et au Docteur Joëlle VEZIERS

Pour ces travaux d'histologie et d'imagerie et pour tout ce temps passé ensemble. Merci pour votre disponibilité, d'avoir pris le temps de répondre à mes demandes. C'est un vrai plaisir de travailler avec vous.

### À Stéphane LAGIER et Yvan BLIN

Merci pour tout. Vous avez toujours été présents et à mon écoute depuis mes débuts au laboratoire d'anatomie jusqu'à aujourd'hui. Merci pour vos conseils, vos services, et surtout votre bonne humeur !

À l'ensemble des praticiens du service de chirurgie infantile de Nantes : Pr. Marc-David LECLAIR, Pr. Antoine HAMEL, Dr. Sophie GUILLARD, Dr. Emmanuelle MAYRARGUE, Dr. Stéphan DE NAPOLI COCCI, Dr. Caroline CAMBY, Dr. Audrey GUINOT, Dr. Sébastien FARAJ, Dr. Antoine CHALOPIN, Dr. Thomas LOUBERSAC. Merci pour ce que vous m'avez apporté depuis le début de mon internat. Et ce n'est pas fini.

À l'ensemble de l'équipe médicale et paramédicale du service de chirurgie orthopédique infantile des Hospices Civils de Lyon. Ce semestre inter-CHU était super. J'ai énormément appris. Au plaisir de vous revoir, en blouse ou sur des skis ! À l'ensemble des praticiens du service de chirurgie orthopédique adulte de Nantes, et en particulier à mes chefs : Dr. GADBLED, Dr. LONGIS, Dr. BRIAND, Dr BOUGUENNEC, Dr. NOAILLES, Dr. PADIOLLEAU. Merci pour votre bienveillance durant ces 3 semestres à vos cotés.

Aux équipes médicales et paramédicales m'ayant accueilli au Centre Hospitalier de La Roche-sur-Yon, en particulier au Dr. VENET, Dr. GIRARD, Dr. TESSON, Dr. LE COUR GRANDMAISON, Dr. FRAQUET, Dr. MARCHAND, Dr. MARRET, Dr. LE PAUL, Dr. POIRIER, Dr VENT. Merci pour tout ce que vous m'avez appris. Vos compétences et votre sympathie raisonnent au delà des frontières Vendéennes et je ne peux que le confirmer. Au plaisir de travailler ensemble.

A mes co-internes de chirurgie infantile et d'orthopédie adulte : Dr. Clémence PFIRRMANN, Dr. Edward DE KEATING, Dr. Cécile TOANEN Dr. Mathieu BOISSARD, Dr. Vincent CRENN, Dr. Kevin BRULEFERT, Dr. Mike PERSIGENT, Dr. Karim MESSIDI, Solène JOSEPH, Nathalie GAVIRA, Yoann VARENNE, Yonis QUINETTE, Marie LETEVE, Julien COUSIN, Marie POUEDRAS, Christophe CARLIER, François LATASTE, Benjamin CHAPAT, Arthur RENAULT, Julien MALLET, My-Van NGUYEN, David GAUDET, Hortense ALLIOT, Ianis COUSIN, Timothée VIGNAUD, et tous les autres... pour tous ces moments passés ensembles. Et à ma première chef Dr. Pui-Pui KIM. À **Coco et Fred,** pour votre disponibilité et votre joie de vivre. Vous êtes des amis en or. Bienvenue Léonore, tu vas voir, tes parents sont tops.

À Samuel, pour ta bienveillance, ta bonne humeur... pour tout en fait.

À Jean, mon ami de toujours.

À **mes parents,** pour l'intérêt que vous portez à tout ce que je fais. Pour vos encouragements, votre disponibilité, votre soutien. Vous avez fait de moi ce que je suis aujourd'hui. Je ne vous remercierai jamais assez. Prenez soin de vous.

À mes frères et sœur : Suzanne, Arnaud, Guy, que j'ai vacciné contre la médecine dès ma première année. Je vous aime.

À ma belle famille, pour leur soutien, leur disponibilité, pour tout ces bons moments passés ensemble.

À Louise et Chloé, qui émerveillent notre vie.

À **Maud**, ma femme. Pour ta patience et ton soutien au quotidien depuis le début de notre histoire. Chaque jour je mesure la chance de t'avoir rencontrée, je m'émerveille devant ta créativité, ton imagination. Ce que nous construisons ensemble est beau. Je ne te le dirai jamais assez : Je t'aime.

# Table des Matières

Reme	rciements :	3
Table	des Matières	7
Liste d	les abréviations :	9
<u>Introd</u>	luction	10
<u>Prérec</u>	<u>quis</u>	
l- Er	mbryologie et croissance des ménisques	11
Α.	Morphogénèse du genou et des ménisques	11
В.	Développement post-natal des ménisques	14
ll - Pł	hylogénie et Anatomie comparée du genou et des ménisques	
Α.	Caractéristiques du genou de l'Homme	15
В.	Anatomie comparée des ménisques	16
III - M	Iorphologie des ménisques	
Α.	Notions générales	
В.	Moyens de stabilisation des ménisques	19
C.	Innervation	23
IV - Hi	istologie du ménisque	
Α.	Constituants du ménisque	24
1	) Les cellules méniscales	24
2	) La matrice extracellulaire	24
В.	Organisation des faisceaux de collagène, ultrastructure méniscale	26
V - A	natomie fonctionnelle	
Α.	Propriétés biomécaniques du ménisque	28
В.	Ménisques et mouvements	29
C.	Rôles des ménisques	30

Ma	Matériels et Méthodes	
۱-	Généralités	. 32
II -	Méthodes d'injection artérielle	. 32
III -	Étude anatomique des artères articulaires du genou	. 34
IV -	Étude de la vascularisation terminale des ménisques	. 34
V -	Analyse microtomodensitométrique de la vascularisation intra-méniscale	. 36

<u>Résultats</u>	. 38		
I - Origine de la vascularisation méniscale : les artères articulaires	. 38		
A. Description des artères articulaires	38		
1) Artère articulaire supéro-latérale	38		
2) Artère articulaire supéro-médiale	39		
3) Artère articulaire inféro-latérale	41		
4) Artère articulaire inféro-médiale	42		
5) Artères articulaires moyennes	43		
6) Artère capsulo-méniscale médiale	45		
B. Anastomoses et arcades péri-méniscales	48		
1) Anastomoses entre les artères articulaires	48		
2) Arcade péri-méniscale latérale	51		
3) Arcade péri-méniscale médiale	51		
II - La vascularisation méniscale terminale : étude anatomique	. 54		
A. Réseau périphérique	54		
B. Réseau sous-synovial	56		
C. Réseau centro-méniscal	58		
III - Étude histologique	. 60		
A. Vascularisation intra-méniscale chez l'adulte	60		
B. Vascularisation intra-méniscale chez l'enfant	62		
C. Comparaison de la vascularisation méniscale adulte et pédiatrique	63		
N/ Étudo microtomodoncitomótrique de la vaccularization mónicado et reconstruct	ion		
TV - Etude microtomodensitometrique de la vascularisation meniscale et reconstruct			
50	.05		
Discussion	<b>C</b> 0		
<u>Discussion</u>			
I - Artères articulaires et vascularisation méniscale	. 69		
II - Discussion de la méthodologie	. 73		
III - Vascularisation méniscale et croissance	. 75		
IV - Vascularisation méniscalo : applications cliniques et perspectives	76		
rv - vascularisation meniscale : applications cliniques et perspectives	. 70		
Conclusion	70		
<u>conclusion</u>	. 70		
Pibliographia			
Dibliographie	. 79		
Liste des figures 87			
Liste des ligures			

Liste des abréviations :

CAMM : corne antérieure du ménisque médial

- CPMM : corne postérieure du ménisque médial
- GAG : glycosaminoglycanes
- HE : Hematoxyline Éosine
- LCA : ligament croisé antérieur
- LCL : ligament collatéral latéral
- LCP : ligament croisé postérieur
- LIM : ligament inter-méniscal
- LMF : ligament ménisco-fémoral
- ML : ménisque latéral
- MM : ménisque médial
- N/mm<sup>2</sup> : Newton / millimètre carré ( = mégapascal)
- Pt : tendon du muscle poplité

Les dégradations arthrosiques observées après de larges méniscectomies emportant le mur méniscal ont permis de comprendre que les ménisques sont la clé de voûte de la répartition des contraintes dans les articulations fémoro-tibiales. Les ménisques doivent être respectés, leur réparation doit toujours être évoquée ou tentée. C'est le principe de « l'économie méniscale ».

Le potentiel de cicatrisation des ménisques est notamment conditionné par l'apport sanguin au niveau de la lésion. Les travaux d'Arnoczky [1] concernant la vascularisation méniscale, datant de 1982, restent aujourd'hui la référence. Pour autant, la vascularisation méniscale est mal connue. Ses descriptions dans les grands ouvrages d'anatomie sont brèves. Quelles artères vascularisent les ménisques ? Comment s'organise la vascularisation méniscale terminale ? Quelle est l'étendue de la vascularisation intra-méniscale ? Les descriptions de la vascularisation extra et intra-méniscale restent peu précises.

L'objectif principal de ce travail était de décrire la vascularisation des ménisques par différentes approches anatomiques, histologiques et d'imagerie. L'objectif secondaire était d'apprécier l'étendue de la vascularisation intra-méniscale chez l'enfant et chez l'adulte.

# I - Embryologie et croissance des ménisques

# A. Morphogénèse du genou et des ménisques

La morphogénèse du genou est un phénomène rapide qui se déroule entre la 4ème et la 14ème semaine de développement. La période critique est donc précoce et correspond au 2ème mois de vie intra-utérine. Toutes les structures articulaires vont apparaître *in situ* [2].

#### 1) Bourgeons de membres

Les bourgeons des membres apparaissent sur les bords latéraux de l'embryon lors de la 4<sup>eme</sup> semaine [3]. Ils sont constitués de mésenchyme provenant du mésoblaste de la lame latérale qui donnera les os, cartilages, tendons, ligaments, vaisseaux ; mais aussi du mésoblaste somitique qui migre dans les bourgeons et donnera les muscles. À l'extrémité distale des bourgeons, l'ectoderme s'épaissit pour former la crête ectodermique apicale. C'est cette dernière qui induira la segmentation du bourgeon en segment de membre. Lors de la 5<sup>eme</sup> semaine, la chondrification débute dans le mésoblaste de la lame latérale dans le sens proximal à distal.

#### 2) Interzone mésenchymateuse

Lors de la 6<sup>ème</sup> semaine de développement, alors que le fémur, le tibia et la fibula ont débuté leur chondrification, le genou apparaît comme une masse homogène de cellules mésenchymateuses. C'est l'interzone mésenchymateuse, ou interzone articulaire *(Fig. 1).* Lors de la 7<sup>ème</sup> semaine (embryon de 18 à 23mm), l'interzone est constituée de 2 couches excentriques et d'une couche intermédiaire dont la densité cellulaire est moindre [4]. Les 2 couches excentriques se densifient, suivent la forme des condyles fémoraux et tibiaux et formeront le cartilage hyalin articulaire. La couche intermédiaire formera, quant à elle, les éléments contenus dans l'espace articulaire. La partie latérale de l'interzone se densifie : elle donnera à terme les ménisques.



**Fig. 1** Coupe d'un genou d'un embryon de 6 semaines (Mérida-Velasco et al. [4]) : L'interzone mésenchymateuse (I), entre le fémur (F) et le tibia (T), constituée de 2 couches excentriques et d'une couche intermédiaire moins dense. Marqueur horizontal : 50µm

À la fin de la 7<sup>eme</sup> semaine, la morphologie du genou est très proche d'un genou mature *(Fig. 2)*, la différenciation cartilagineuse du fémur, du tibia et de la fibula est terminée. La patella est en cours de chondrification et l'appareil extenseur est bien identifiable. Dans l'interzone articulaire, alors que le ligament croisé postérieur (LCP) est bien visible, la densification cellulaire des futurs ménisques se poursuit. C'est le ménisque latéral qui s'individualise en premier.



**Fig. 2** Coupe sagittale d'un genou d'un embryon de 7,5 semaines (Mérida-Velasco et al. [4]). La morphologie du genou est semblable à un genou mature. Entre le fémur (F) et le tibia (T) : l'interzone mésenchymateuse. (2 : ligament croisé postérieur, Q : quadriceps, P : patella, 1 : ligament patellaire)

#### 3) Cavitation

La cavitation de l'articulation débute au cours de la 8<sup>ème</sup> semaine. Ainsi lors de la 9<sup>ème</sup> semaine apparaissent une interligne fémoro-tibiale, 2 interlignes fémoro-méniscales et 2 interlignes ménisco-tibiales. A l'intérieur, des tracti de tissus conjonctifs cloisonnent les cavités. À ce stade, les 2 ménisques sont bien reconnaissables. Ils sont triangulaires à la coupe, riches en cellules, pauvres en collagène, indemnes de tissus fibro-cartilagineux. Ils sont adhérents à la capsule articulaire, qui est maintenant bien visible, par l'intermédiaire du ligament coronaire. (*Fig. 3*).



**Fig. 3** Coupe coronale d'un genou d'un embryon à 9 semaines (Mérida-Velasco et al. [4]). (7 : cavité fémoro-méniscale, 8 : cavité ménisco-tibiale, 9 : cavité fémoro-tibiale, 10 : ménisque interne, 4 : capsule articulaire)

À la  $10^{\text{eme}}$  semaine, les cornes méniscales sont bien visibles et sont fixées aux condyles tibiaux par l'intermédiaire du tissu conjonctif. À ce stade, les cavités ménisco-tibiales et ménisco fémorales communiquent largement entre elles. Puis l'interligne tibio-fibulaire supérieure apparaît et est en continuité avec la cavité ménisco-tibiale latérale. Son individualisation en fin de  $12^{\text{ème}}$  semaine signe la fin de la cavitation, bien que la communication entre les 2 interlignes persiste dans 1/3 des cas.

#### 4) Histologie des ménisques en période fœtale

Il existe un asynchronisme de développement entre les ménisques, le ménisque latéral se développe plus précocement que le ménisque médial [5]. Lors de la 14<sup>ème</sup> semaine de développement, les fibroblastes du ménisque latéral sont alignés alors qu'aucune organisation cellulaire ne se dégage dans le ménisque médial. L'organisation fasciculaire sinusoïde des fibres de collagène apparaît lors de la 17<sup>ème</sup> semaine de développement. À la 25<sup>ème</sup> semaine, les faisceaux de collagène du ménisque latéral se sont épaissis et sont parallèles les uns aux autres, alors que cette organisation n'apparaît pas encore clairement dans le ménisque médial.

La vascularisation des ménisques fœtaux est plus dense au niveau des cornes et de la capsule articulaire du genou. Cependant, à la différence des ménisques de l'adulte, l'ensemble des ménisques fœtaux est vascularisé. Ce n'est qu'à partir de la période postnatale que la densité vasculaire méniscale va diminuer de façon centrifuge [6].

## B. Développement post-natal des ménisques

Après la naissance, le rapport entre le volume cellulaire méniscal et le volume des fibres de collagène s'inverse à l'avantage de la matrice extracellulaire collagénique. Les noyaux des fibroblastes deviennent petits et denses.

Entre 3 et 9 ans : l'organisation des faisceaux de collagène se poursuit, probablement en lien avec la mise en charge et la marche : les faisceaux sont préférentiellement circulaires, parallèles au mur méniscal. Quelques fibres radiaires apparaissent à proximités des surfaces crâniales et caudales des ménisques et croisent les fibres circulaires. La membrane synoviale recouvrant les ménisques devient de plus en plus fine, surtout au niveau des zones de charge avec seulement une à deux couches cellulaires [5].

À l'âge adulte, les éléments constituant le ménisque continuent d'évoluer. La densité en collagène augmente jusqu'à 30 ans, se stabilise et commence à diminuer vers 80 ans au profit de protéines non collagéniques [7]. Le vieillissement des ménisques est également marqué par une modification des protéoglycanes de la matrice extracellulaire, modification semblable à celles observées dans la senescence du cartilage articulaire [8].

Selon Clark et al. [5], la surface du condyle tibial recouverte par les ménisques, c'est-à-dire le rapport surface du ménisque / surface du condyle tibial est stable pendant la croissance. Le ménisque latéral recouvre davantage le condyle tibial latéral (rapport : 0,75) que son homologue médial (rapport 0,6).

# II - Phylogénie et Anatomie comparée du genou et des ménisques

### A. Caractéristiques du genou de l'Homme

Les caractéristiques anatomiques du genou ne sont pas spécifiques à l'espèce humaine. En effet, de part notre évolution commune, il existe des similitudes morphologiques avec les tétrapodes, comme les primates, les mammifères, mais aussi les oiseaux, les reptiles ou même les amphibiens [9]. La morphologie du genou de l'Homme, « bipède permanent », se distingue par 3 caractéristiques spécifiques [10–12] :

L'angle bicondylaire du fémur, ou angle d'obliquité fémorale : il correspond à l'angle entre l'axe diaphysaire du fémur et la perpendiculaire à la ligne infracondylaire. Cet angle est de 0° chez le chimpanzé, et d'environ 7° chez l'Homme (*Fig. 4*). La modification de l'angle bicondylaire s'explique par l'évolution de l'Homme et l'acquisition de la « bipédie permanente » : afin d'obtenir un axe mécanique rectiligne entre la hanche, le genou et la cheville en position debout, l'angle bicondylaire évolue de 0 à 7°. D'ailleurs, l'angle bicondylaire d'un nouveau né est nul, c'est vers 1 à 4 ans après l'acquisition de la marche que cet angle se modifie, et à l'inverse cet angle reste nul chez un enfant non marchant [13].



*Fig. 4* Fémur d'un homme (Ho), d'un chimpanzé (Ch) et d'un cercopithèque (Ce). Le fémur humain a un angle bicondylaire de 7° et une trochlée fémorale creusée alors que chez le primate non humain, l'angle bicondylaire est nul et la trochlée fémorale est plate (Tardieu et al. [13])

- La gorge de la trochlée fémorale : chez le chimpanzé, la trochlée fémorale est plate, alors que chez l'Homme, elle est creuse et sa lèvre latérale est saillante (*Fig. 4*). Cette évolution morphologique est directement liée à la modification de l'angle bicondylaire. En effet, lorsque le quadriceps se contracte, la patella à tendance à se luxer latéralement du fait de cet angle. L'évolution morphologique de la trochlée fémorale lutte contre cette luxation latérale de la patella [14].
- Le rayon de courbure du condyle fémoral latéral et la forme du condyle tibial latéral : Chez le primate non humain, le profil du condyle fémoral latéral est circulaire, alors qu'il est elliptique chez l'Homme. Le rayon de courbure croit d'avant en arrière jusqu'à un point « *t* », puis décroit à partir de ce point « *t* » [14]. Chez les primates non humains, le condyle tibial latéral est très convexe vers le haut. L'absence de congruence entre le condyle fémoral circulaire et le condyle tibial fortement convexe vers le haut assure un compartiment fémoro-tibial latéral très mobile et permet des mouvements de rotations du genou entre le fémur et le tibia, bien utiles pour les déplacements arboricoles. À l'inverse chez l'homme : le condyle tibial latéral est beaucoup moins convexe vers le haut. L'association condyle fémoral elliptique et condyle tibial légèrement convexe permet d'augmenter la surface de contact, de diminuer l'incongruence et d'augmenter la stabilité du compartiment fémoro-tibial latéral par rapport aux primates non humains.

#### B. Anatomie comparée des ménisques

La morphologie des ménisques est directement liée à la forme des épiphyses fémorale distale et tibiale proximale. Les ménisques humains sont plus étroits et moins épais que ceux des autres mammifères [15]. La morphologie du ménisque médial est très proche d'une espèce à l'autre, le ménisque médial étant semi-lunaire et stabilisé sur le tibia par 2 freins méniscaux antérieur et postérieur. C'est au niveau du ménisque latéral qu'il existe de nombreuses différences morphologiques [12,16]. Chez l'Homme comme chez la plupart des mammifères, le ménisque latéral est également semi-lunaire et est stabilisé sur le tibia par 2 freins méniscaux antérieur et postérieur qui sont plus proches l'un de l'autre que ses homologues médiaux (Fig. 5) [16]. Bien que le primate non humain soit le mammifère le plus proche de l'Homme, l'anatomie du ménisque latéral du primate non humain diffère des autres mammifères. Chez le primate non humain, le ménisque latéral peut être semilunaire (lémuriens, tarsiers, orangs-outans) ou annulaire (gibbons, gorilles, chimpanzés) mais quelque soit l'espèce, le ménisque latéral n'est stabilisé que par un unique frein méniscal antérieur s'insérant sur le tubercule inter-condylaire latéral. Le ménisque latéral est donc beaucoup plus mobile chez le primate non humain que chez l'Homme. Cette « divergence anatomique » s'explique par le mode de vie arboricole des singes et la grande mobilité du compartiment fémoro-tibial latéral permettant des mouvements de rotation du genou plus amples que l'Homme [10,12].



*Fig. 5 Vues crâniales de l'épiphyse proximale du tibia droit d'un humain (a), chimpanzé (b), chien (c), mouton (d). Le ménisque latéral chez certains primates non humains dont le chimpanzé est annulaire et n'a qu'un seul frein méniscal, d'où son importante mobilité sur le condyle tibial latéral (Dessin : d'après Proffen et al. [16] et Beaufils et al. [17])* 

# III - Morphologie des ménisques

## A. Notions générales

Au nombre de 2 par genou, les ménisques sont des structures fibro-cartilagineuses semi-lunaires situées entre les condyles fémoraux et les condyles tibiaux. Il existe donc un ménisque médial dans le compartiment fémoro-tibial médial et un ménisque latéral dans le compartiment fémoro-tibial latéral. Le ménisque médial a une forme de « C », le ménisque latéral est plus fermé en forme de « O » (*Fig. 6*).

Triangulaire à la coupe, les ménisques présentent 3 faces. La face crâniale est concave vers le haut et épouse la forme du condyle fémoral. La face caudale est plate ou légèrement convexe vers le bas et répond à la forme du condyle tibial. La face périphérique, appelée aussi « mur méniscal », est indissociable la capsule articulaire (cf. III B. Moyens de stabilisation des ménisques). Le bord libre, partie centrale du ménisque, est fin. Le ménisque peut être segmenté en 3 parties : la corne méniscale antérieure ou segment antérieur, le segment moyen et la corne méniscale postérieure ou segment postérieur.



**Fig. 6** Morphologie des ménisques : a) vue crâniale d'un ménisque latéral droit. Les ménisques sont constitués d'un segment antérieur ou corne antérieure, d'un segment moyen et d'un segment postérieur ou corne postérieur. b) Coupe radiaire d'un ménisque latéral droit. Les ménisques ont un aspect triangulaire à la coupe et sont constitués de 3 faces : une face crâniale concave vers le haut en contact avec le condyle fémoral, une face caudale en contact avec le condyle tibial et une face périphérique ou « mur méniscal » fixée à la capsule articulaire par l'intermédiaire du ligament coronaire (A : segment antérieur, M : segment moyen, P : segment postérieur, Périph : face périphérique)

La taille des ménisques varie d'un individu à l'autre. McDermott et al. [18] ont montré que la dimension des ménisques est corrélée à la dimension des condyles tibiaux. Dans sa série de 88 ménisques adultes, la longueur antéro-postérieure moyenne du ménisque latéral était de 35,7±3,7mm et la largeur moyenne du ménisque latéral était de 29,3±3mm. La longueur antéro-postérieure du ménisque médial était de 45,7±5mm, la largeur moyenne du ménisque médial était de 27,4±2,5mm. La variation inter-individuelle des mesures était plus importante pour le ménisque médial que pour le ménisque latéral.



**Fig. 7** Morphologie des ménisques : les longueurs antéro-postérieures moyennes (flèches rouges) sont respectivement de 35,7±3,7mm pour le ménisque latéral et de 45,7±5mm pour le ménisque médial. Les largeurs moyennes (flèches jaunes) sont respectivement de 29,3±3mm pour le ménisque latéral et de 27,4±2,5mm pour le ménisque médial

La surface des ménisques adultes est d'environ 450mm<sup>2</sup>. Le ménisque latéral recouvre d'avantage le condyle tibial que son homologue médial [5]. À l'âge adulte, la surface du condyle tibial latéral est de 620mm<sup>2</sup>, alors que celle du condyle tibial médial est de 740mm<sup>2</sup> [5,19].

#### B. Moyens de stabilisation des ménisques

Les ménisques sont stabilisés dans l'articulation par des ligaments. Il existe de nombreux ligaments méniscaux.

#### 1) Insertion capsulaire : ligament coronaire

La face périphérique du ménisque, appelée « mur méniscal », adhère à la face interne de la capsule articulaire via le ligament coronaire *(Fig. 8).* Le mur méniscal et la capsule articulaire sont en fait indissociables macroscopiquement. La totalité du mur méniscal est adhérent à la capsule, exceptées au niveau des extrémités des cornes méniscales et au niveau du hiatus poplité : la portion intra-capsulaire du tendon du muscle poplité passe entre le ménisque latéral et la capsule. Le ménisque latéral est ainsi moins fixé que son homologue médial.

#### 2) Insertions tibiales : ligaments ménisco- tibiaux

Chaque corne méniscale est fixée au condyle tibial par un ligament ménisco-tibial. Ce sont des expansions de fibres collagéniques circonférentielles constituant le ménisque venant s'insérer dans l'os sous chondral de l'épiphyse tibiale crâniale. Il existe donc 4 ligaments ménisco-tibiaux, 2 par ménisque (*Fig. 8*). Le ligament ménisco-tibial antérieur du ménisque latéral s'insère en avant et en dehors de l'insertion tibiale du ligament croisé antérieur. Le ligament ménisco-tibial postérieur du ménisque latéral s'insère en avant de l'insertion tibiale du ligament croisé postérieur. Concernant le ménisque médial : le ligament ménisco-tibial antérieur s'insère 6 à 7mm en avant de l'insertion tibiale du ligament croisé antérieur. Le ligament ménisco-tibial postérieur s'insère quant à lui entre l'insertion tibiale du ligament croisé postérieur et l'insertion du ligament ménisco-tibial postérieur du ménisque latéral.

La littérature anglo-saxone nomme ces ligaments « anterior and posterior insertional ligaments ». La nomenclature française est moins claire : ils sont parfois nommés « ligaments ménisco-tibiaux », « insertions méniscales », « racines méniscales » ou encore « freins méniscaux ».



**Fig. 8** Moyens de stabilité des ménisques : a) vue crâniale d'un ménisque médial droit. La totalité du mur méniscal est adhérent à la capsule articulaire grâce au ligament coronaire (flèche bleue) à l'exception du segment postérieur qui est fixé par un fin ligament ménisco-capsulaire (flèche rouge). b) vue crâniale d'un ménisque latéral droit. La totalité du mur méniscal est adhérent à la capsule articulaire (flèche bleue), sauf au niveau du hiatus poplité où le tendon poplité passe entre la capsule et le mur méniscal (flèche verte) (LMT : ligament ménisco-tibial, LIM : ligament inter-méniscal, LMF : ligament ménisco-fémoral, LCA : ligament croisé antérieur, LCP : ligament croisé postérieur, Pt : tendon poplité)

#### 3) Insertions fémorales : ligaments ménisco-fémoraux

Il existe 2 ligaments ménisco-fémoraux : le ligament ménisco-fémoral postérieur de Wrisberg et le ligament ménisco-fémoral antérieur de Humphrey. Leur insertion méniscale est commune et se trouve sur le bord périphérique de la corne postérieure du ménisque latéral. Leur trajet est celui du ligament croisé postérieur : vers le haut, l'avant et le dedans. Le ligament ménisco-fémoral antérieur passe en avant du ligament croisé postérieur, le ligament ménisco-fémoral postérieur en arrière. Ils s'insèrent ensuite dans l'échancrure inter-condylaire et sur la face latérale du condyle fémoral médial : le ligament méniscofémoral antérieur en avant du ligament croisé postérieur, le ligament méniscofémoral antérieur en avant du ligament croisé postérieur, le ligament méniscofémoral antérieur en avant du ligament croisé postérieur, le ligament ménisco-fémoral

De nombreuses études se sont penchées sur ces ligaments. Décrits comme inconstants (Heller retrouvait au moins un ligament ménisco-fémoral dans 71% des cas [20], 94% pour Radoïévitch [21]) certains travaux plus récents retrouvent au moins un ligament ménisco-fémoral dans 100% des cas [22–24]. Pour Kusayama, le ligament ménisco-fémoral antérieur était isolé dans 23% des cas, le ligament ménisco-fémoral postérieur était isolé dans 31% des cas, il retrouvait 2 ligaments ménisco-fémoraux dans 46% des cas [22]. Kohn quant à lui retrouvait un ligament ménisco-fémoral antérieur dans 50% des cas, un ligament ménisco-fémoral postérieur dans 76% des cas [24]. Le rôle des ligaments ménisco-fémoraux est semblable au ligament croisé postérieur [25], mais ils sont également stabilisateurs de la corne postérieure du ménisque latéral, notamment en flexion : les ligaments méniscofémoraux limitent la translation postérieure du ménisque latéral.

#### 4) Insertions patellaires : ligaments ménisco-patellaires

Les 2 ligaments ménisco-patellaires s'insèrent sur le bord périphérique de la corne antérieure des ménisques correspondants, se dirigent vers le haut et vers l'avant pour se terminer sur le bord médial ou latéral de la patella. Le ligament ménisco-patellaire constitue avec le ligament fémoro-patellaire la couche profonde des rétinacula patellaires, leurs insertions patellaires sont communes.

Les ligaments ménisco-patellaires participent à la stabilisation de la patella dans le plan frontal, surtout à partir de 45° de flexion [26].

#### 5) Ligament inter-méniscal de Winslow

Le ligament inter-méniscal de Winslow, appelé également ligament jugal ou ligament transverse du genou relie la corne antérieure des ménisques latéral et médial *(Fig. 8).* Pour Nelson et al. [27], ce ligament est présent dans 94% des cas. L'insertion méniscale varie : dans 46% des cas, le ligament s'insère uniquement sur les cornes antérieures (type I), dans 26% des cas, il s'insère sur les cornes antérieures avec une expansion sur la capsule articulaire (type II) et dans 12% des cas, le ligament ne s'insère que sur la capsule articulaire sans insertion méniscale (type III).

#### 6) Autres moyens de stabilisation

Le ligament collatéral médial (LCM) est adhérent au ménisque médial, par l'intermédiaire de fibres tibio-méniscales du plan profond du ligament. Ces fibres s'insèrent sur la face médiale du tibia, en arrière de la patte d'oie, se dirigent vers le haut, passent en dedans du tendon du semi-membraneux, pour s'insérer sur le bord périphérique du segment moyen du ménisque médial.

Le tendon récurrent de l'insertion distale du semi-membraneux, encore appelé ligament poplité oblique, donne des expansions fibreuses qui s'insèrent sur la corne postérieure du ménisque médial [28]. Kim et al. ont retrouvé également des expansions fibreuses s'insérant sur la corne postérieure du ménisque latéral dans 43% des cas [29].

#### 7) Particularité du ménisque médial

La corne postérieure du ménisque médial (CPMM) n'est stabilisée que par le ligament ménisco-tibial. Le bord périphérique de la CPMM est fixé à la capsule articulaire non pas par le ligament coronaire mais par un fin ligament ménisco-capsulaire (*Fig. 8*). La CPMM est donc plus mobile. Elle est d'ailleurs soumise à de fortes contraintes, notamment lors d'une lésion du ligament croisé antérieur (LCA). Le tiroir antérieur du tibia entraine une augmentation des contraintes en compression du condyle fémoral médial sur la CPMM et peut être à l'origine d'une lésion typique de cette dernière : la « ramp lesion ». Le rôle biomécanique du ligament ménisco-capsulaire [30] et l'anatomie locale de la CPMM expliquent que cette lésion soit fréquemment associée à une rupture du LCA. Selon les séries, l'association « rupture du LCA » et « ramp lesion » est retrouvée dans 15,4% à 17% des cas [31-33] et jusqu'à 23% des cas dans la population pédiatrique [34].

De nombreuses variations anatomiques ont été décrites au niveau du ligament ménisco-tibial de la corne antérieure du ménisque médiale (CAMM), notamment au niveau de son insertion tibiale. Dans 3 à 14%, ce ligament est absent [27,35] : la CAMM est donc stabilisée uniquement par le ligament inter-méniscal de Winslow.

### C. Innervation

Quelques travaux ont étudié l'innervation intra-méniscale [36–38]. De fins filets nerveux intra-méniscaux récoltent des informations sensitives et sensorielles et convergent vers la capsule articulaire puis les nerfs articulaires du genou. La plupart des auteurs retrouvent une innervation du 1/3 périphérique du ménisque, l'innervation des cornes antérieure et postérieure est plus dense que celle du corps méniscal. Les récepteurs sensitifs sont des mécano-récepteurs contribuant à la sensibilité profonde de l'articulation (corpuscules de Pacini, terminaisons de Ruffini, organes tendineux de Golgi) [38,39]. Il existe également des fibres nerveuses à terminaison libre correspondant à des récepteurs nociceptifs. Ainsi, en plus de leurs rôles biomécaniques, les ménisques apportent des informations proprioceptives sur l'articulation du genou.

# IV - Histologie du ménisque

### A. Constituants du ménisque

Le ménisque humain sain est composé de 72% d'eau, de 22% de collagène, 0,8% de glycosaminoglycanes et 0,12% d'ADN [40]. Son poids sec est donc essentiellement constitué de fibres de collagène. La densité cellulaire est faible : seulement 2% de l'ensemble des constituants du ménisque adulte.

#### 1) Les cellules méniscales

Il existe 4 populations cellulaires au sein du ménisque [41] :

#### Fibrochondrocytes

Ce sont des cellules arrondies qui ressemblent en microscopie à des chondrocytes mais elles synthétisent une matrice fibro-cartilagineuse riche en collagène de type I. Elles sont essentiellement réparties dans les 2/3 centraux du ménisque, là où les forces de compression sont les plus importantes. La vascularisation des 2/3 centraux du ménisque étant très précaire, les fibrochondrocytes vivent en hypoxie à l'état physiologique. Leur source d'énergie est probablement la glycolyse anaérobie.

#### Cellules fibroblastes-like

Appelées ainsi car elles ressemblent et se comportent comme des fibroblastes du tissu conjonctif, elles sont aplaties, d'aspect étoilé et interconnectées au niveau de leurs prolongements cytoplasmiques. Elles sont surtout réparties dans le 1/3 périphérique du ménisque, là où les forces en tension sont les plus importantes.

#### Cellules fusiformes superficielles

Possiblement d'origine synoviale, les cellules fusiformes sont situées à la surface des ménisques.

#### Cellules intermédiaires

Les cellules intermédiaires ont un phénotype proche des fibrochondrocytes et des cellules fibroblastes-like. Elles sont situées dans la partie la plus périphérique du ménisque.

#### 2) La matrice extracellulaire

Il existe 4 grandes familles de macromolécules au sein de la matrice extra-cellulaire du ménisque : les collagènes, les protéoglycanes, les glycoproteïnes et l'élastine.

#### a. <u>Le collagène</u>

Le collagène constitue 60 à 70% du poids sec au sein du ménisque. Plusieurs types de collagène sont retrouvés [42] :

**Collagène de type I**: c'est le plus abondant dans les 2/3 périphériques du ménisque (80%). Il est moins abondant dans le 1/3 central (40%)

- **Collagène de type II** : il est presque totalement absent dans les 2/3 périphériques mais majoritaire dans le 1/3 central (60%)
- Collagène de type III et V : moins de 1% de l'ensemble du ménisque
- **Collagène de type VI :** moins de 1% de l'ensemble du ménisque, son architecture moléculaire le classe dans la famille des glycopeptides.

#### b. Les protéoglycanes

Les protéoglycanes sont des macromolécules composées d'une protéine centrale et de glycosaminoglycanes (GAG). Ce sont des macromolécules chargées négativement retenant l'eau par effet osmotique. Dans le ménisque, il existe 4 types de GAG : chondroïtine 6-sulfate (40%), dermatane sulfate (25%), chondroïtine 4-sulfate (20%) et kératane sulfate (15%) [40]. C'est l'aggrécane qui est le protéogylcane majoritaire dans le tissu méniscal, mais en densité moins importante que dans le tissu cartilagineux. Le monomère d'aggrécane est composé de 100 à 200 chaines de chondroïtine 4-sulfates et de kératanes sulfates.

#### c. Les glycoproteïnes

Elles sont nombreuses. Parmi elles, la fibronectine et la thrombospondine qui, via de nombreuses liaisons moléculaires, participent à l'architecture du ménisque.

#### d. <u>L'élastine</u>

L'élastine est présente de manière homogène dans le ménisque. Sa quantité diminue avec l'âge [43].



**Fig. 9** a) Coupe radiaire d'un segment moyen d'un ménisque médial colorée à l'hématoxyline-éosine. b) Agrandissements de la coupe a). La lame de fasciculation est constituée de faisceaux de collagène radiaires et contient les vaisseaux centro-méniscaux (flèche rouge). Les bourrelets de glissement contiennent des cellules fusiformes superficielles.

## B. Organisation des faisceaux de collagène, ultrastructure méniscale

Au sein du ménisque, les faisceaux de collagène sont organisés en réseaux complexes à l'intérieur desquels sont interposées les cellules. L'organisation de ces faisceaux et la structure intrinsèque des ménisques ont fait l'objet de nombreux travaux. Pour Sick [44], l'ultrastructure méniscale est comparable à celle des tendons ou des ligaments : le ménisque est un tissu fibreux soumis à des forces de pressions ou de glissements. Il distingue en microscopie optique 4 éléments structurels (**Fig. 10**) :

- Le bourrelet de glissement : ce sont les parties les plus superficielles du ménisque en contact avec le fémur et le tibia. Le bourrelet se prolonge en périphérie par la membrane synoviale.
- La couche de pression : correspond environ aux 2/3 centraux du ménisque. Elle est dite avasculaire.
- La couche de traction : correspond environ au 1/3 périphérique du ménisque. Elle est vascularisée.

 La lame de fasciculation : constituée de faisceaux de collagène radiaires en profondeur du ménisque s'étendant de la partie la plus périphérique vers la partie moyenne. Elle contient le réseau vasculaire centro-méniscal.



*Fig. 10* schéma d'une coupe transversale du ménisque : organisation intrinsèque d'après Sick et al. [44] (BG : bourrelet de glissement, CP : couche de pression, CT : couche de traction, LF : lame de fasciculation)

L'apport de la microscopie électronique a permis de préciser l'organisation des faisceaux de collagène [45,46]. Le 1/3 périphérique contient de volumineux faisceaux de collagène à orientation circonférentielle. Ces faisceaux se prolongent dans les cornes méniscales et participent à la formation des freins méniscaux. Les 2/3 centraux contiennent des faisceaux de collagène à direction radiale parallèles à la surface articulaire. Plus récemment, Peterson et Tillmann ont précisé que la distribution circonférentielle des fibres de collagène ne se limite pas au 1/3 périphérique, mais s'étend au delà de la partie moyenne du ménisque [45].

Ainsi, les réseaux de collagène ne sont donc pas bien distincts mais sont entrelacés au sein du ménisque *(Fig. 11)* [47]. La partie périphérique du ménisque est constituée d'un tissu conjonctif dense ressemblant au tissu tendineux plus riche en collagène de type I. La partie centrale et les couches superficielles du ménisque sont composées d'un tissu fibrocartilagineux plus riche en collagène de type II.



*Fig. 11* a) Schéma illustrant les réseaux de collagène au sein du ménisque. Les chiffres correspondent aux coupes de la Fig. 8 b). b) coupes méniscales et analyses microscopiques des faisceaux de collagène. Les différents réseaux sont entrelacés. La densité du collagène au niveau des bourrelets de glissement est élevée. (Bullough et al. [47])

# V - Anatomie fonctionnelle

## A. Propriétés biomécaniques du ménisque

#### 1) Résistance à la traction

De nombreux travaux se sont intéressés à la résistance du tissu méniscal en traction [48,49]. Pour Tissakht et al. [49], la force de résistance à la traction des ménisques est très importante lorsque la force exercée sur le ménisque est tangente à sa circonférence (80 à 125 N/mm<sup>2</sup>) alors qu'elle est moindre lorsque la force exercée est radiaire (1,7 à 3,6 N/mm<sup>2</sup>). Cette force de résistance importante signe une haute rigidité du ménisque à la traction. Cette différence de résistance à la traction s'explique notamment par l'orientation circonférentielle des fibres de collagène de la moitié périphérique du ménisque.

#### 2) Résistance à la compression

Le tissu méniscal est moins résistant en compression qu'en traction. Cependant, il est plus déformable et plus résistant aux forces de compression verticale qu'aux forces de compression radiale ou circonférentielle ce qui lui permet de faire face aux forces de compression entre les condyles fémoraux et tibiaux [50].

#### 3) Résistance au cisaillement

Pour Skaggs et al. [51] les forces de cisaillement sont les forces responsables des lésions en anse de seau. Là où le tissu méniscal contient des fibres radiaires de collagène (les 2/3 centraux du ménisque), la résistance aux forces de cisaillement est plus importante (5N/mm<sup>2</sup>) que dans les zones dépourvues de fibres radiaires (1,5N/mm<sup>2</sup>).

#### B. Ménisques et mouvements

La dynamique de l'articulation du genou est complexe. Les modélisations mécaniques présentées dans la littérature sont nombreuses et parfois très sophistiquées lorsqu'elles incluent les structures caspulo-ligamentaires et musculaires. Mais toutes s'accordent pour dire qu'en flexion, l'extrémité distale du fémur recule par rapport au tibia : pendant les premiers degrés de flexion, les condyles fémoraux « roulent » sur les condyles tibiaux, puis à environ 20-30° de flexion, un mouvement de « glissement » des condyles s'ajoute au « roulement ». Ce mouvement de « roulement » s'estompe en fin de flexion, les derniers degrés de flexion n'étant qu'un mouvement de « glissement » des condyles fémoraux sur les condyles tibiaux.

Les ménisques suivent le recul des condyles fémoraux lors de la flexion du genou. Vedi et al. ont étudié les mouvements des ménisques *in vivo* sur les genoux humains en charge en utilisant une IRM ouverte [52]. C'est le ménisque latéral qui recule le plus, en raison du recul plus important du condyle fémoral latéral, ce qui induit une rotation médiale automatique du tibia lors de la flexion du genou. Les cornes antérieures des ménisques reculent plus que les cornes postérieures. Les cornes postérieures étant moins mobiles, elles ont un rôle de « cales postérieures » et luttent contre le recul trop important du fémur. Elles sont donc plus exposées aux forces du fémur sur le tibia, ce qui explique qu'elles soient plus souvent lésées que les cornes antérieures. Les ménisques semblent plus mobiles lors de la flexion en charge *(Fig. 12).* 



*Fig.* 12 *Schéma illustrant le recul des ménisques lors de la flexion du genou. a) genou en charge, b) genou non en charge (Vedi et al. [52])* 

## C. Rôles des ménisques

#### 1) Transmission et répartition des contraintes entre le fémur et le tibia

Les ménisques améliorent la congruence entre le fémur et le tibia, en particulier dans le compartiment latéral où le condyle fémoral est convexe vers le bas et le condyle tibial convexe vers le haut. Par l'intermédiaire des ménisques, la surface en contact est augmentée. Les forces de compression entre le fémur et le tibia sont proportionnelles à la charge exercée (notamment le poids du corps) et inversement proportionnelles à la surface de contact entre le fémur et le tibia. Ainsi pour une force de compression constante : plus la surface de contact est grande, plus les forces de compression par unité de surface est faible. Une méniscectomie totale diminue la surface de contact entre le fémur et le tibia et entraine donc une augmentation des forces de compression sur la surface de contact restante. Cette augmentation serait de plus de 200% selon certaines études [53,54], d'où l'importance du principe de l'économie méniscale, la méniscectomie étant arthrogène.

Enfin une partie des forces de compression verticale sont converties en forces axiales grâce à la forme triangulaire des ménisques. Leurs moyens de fixation aux condyles tibiaux luttent contre l'extrusion méniscale et absorbent ces forces axiales.

#### 2) Diminution du coefficient de friction entre les condyles fémoraux et tibiaux

Ce sont surtout les 2/3 centraux du ménisque qui, lors de la flexion de l'articulation, ont un rôle dans la diminution du coefficient de friction et donc un rôle de lubrification de l'articulation [55]. Ces propriétés découlent de la structure fibrocartilagineuse des ménisques, notamment sa forte teneur hydrique grâce à sa matrice extracellulaire riche en protéoglycanes, mais aussi l'orientation radiale des fibres de collagène qui luttent contre les forces de cisaillement. De plus, l'existence de 2 espaces de glissements entre le fémur et le tibia (fémur - ménisque et ménisque - tibia) augmente la surface de contact et diminue donc le coefficient de friction.

#### 3) Participation à la proprioception

Les ménisques apportent des informations proprioceptives grâce à leur innervation sensitive riche en mécanorécepteurs (corpuscules de Pacini, terminaisons de Ruffini, organes tendineux de Golgi). Ils participent donc à l'équilibre grâce à la sensibilité proprioceptive de l'articulation [38].

#### 4) Stabilisation des articulations fémoro-tibiales

L'augmentation de la congruence articulaire entre le fémur et le tibia permet également d'améliorer la stabilité de l'articulation. Selon A. Trillat, les ménisques ont un rôle de « cales stabilisatrices » [56]. Ce sont surtout les cornes postérieures et notamment la corne postérieure du ménisque médial qui interviennent dans la stabilité en luttant contre le recul trop important du fémur lors de la flexion du genou.

Ce rôle est accessoire lorsque le ligament croisé antérieur est présent. En revanche lorsque le ligament croisé antérieur est rompu, les ménisques deviennent des stabilisateurs et sont alors soumis à des contraintes plus importantes. En effet, ligament croisé antérieur et ménisque médial sont interdépendants : une rupture isolée du ligament croisé antérieur entraine une augmentation des contraintes exercées sur la corne postérieure du ménisque médial et une lésion longitudinale sur la corne postérieure ou une méniscectomie médiale entraine une augmentation de la tension exercée sur le LCA [57,58]. Strobel et al. [59] ont montré que lorsque le ligament croisé antérieur est rompu, il pouvait apparaître une lésion capsulo-méniscale longitudinale de la corne postérieure du ménisque médial. Cette lésion, baptisée par la suite « ramp lesion » augmente l'instabilité du genou dans le plan frontal. Il est donc indispensable de la rechercher et de la traiter lors d'une reconstruction chirurgicale du ligament croisé antérieur [60].

# I - Généralités

Il s'agit d'une étude anatomique observationnelle sur pièces anatomiques humaines réalisée au Laboratoire d'Anatomie de l'Université de Nantes entre septembre 2015 et juin 2018.

L'ensemble des genoux sélectionnés provenait de sujets anatomiques frais conservés à 4°C sauf les ménisques pédiatriques qui provenaient de pièces opératoires. À l'exception des pièces utilisées pour l'étude histologique, les genoux étaient préalablement injectés selon 3 modalités différentes : l'injection au latex-néoprène, l'injection à la gélatine colorée à l'encre de Chine et l'injection au sulfate de baryum. Les critères d'exclusion des pièces anatomiques étaient la présence d'une cicatrice sur le genou, l'existence d'une déformation majeure dans le plan frontal ou sagittal, une obésité morbide, la présence d'un tissu synovial inflammatoire ou encore un défaut d'injection artérielle constatée lors de la dissection.

Sur les 38 genoux, 34 genoux ont été utilisés pour réaliser ces travaux. 1 genou a été exclu après la constatation d'une inflammation majeure du tissu synovial, 3 genoux ont été exclus suite à l'échec de l'injection. 14 genoux droits et 20 genoux gauches provenant de 10 femmes et de 24 hommes ont été disséqués. L'âge moyen des sujets anatomiques disséqués était de 76,7 (de 7 à 97 ans). Une fois les travaux de dissection débutés, les genoux étaient conservés dans du formol dilué à 5%.

Pour chaque dissection anatomique, des photographies ont été réalisées avec un appareil photo numérique (Boitier : Nikon<sup>®</sup> Reflex D5100, Objectif : Nikon<sup>®</sup> DX AF-S Micro NIKKOR 40mm f1:2,8G , Tokyo 100-8331, Japan). L'ensemble des observations et des données a été traitée sur Excel<sup>®</sup> ( Excel<sup>®</sup>, 2016 Microsoft, USA).

# II - Méthodes d'injection artérielle

#### 1) Cathétérisation artérielle

Les genoux étaient réchauffés avec des draps chauds avant de réaliser l'injection. L'artère fémorale superficielle était abordée par une courte incision à la face antérieure de la cuisse. Après une artériotomie transversale, le segment aval était cathétérisé par une tubulure rigide de diamètre 6mm (tubulure 6mm/4mm, Zolux, France). La tubulure était ensuite fixée par un fil tressé (type Mersuture ou équivalent). Le segment d'amont était ligaturé.

#### 2) Technique d'injection au latex-néoprène

Le produit injecté était du Latex néoprène 671 (S.A.F.I.C. Alcan&co, Puteau, France) mélangé avec du colorant universel pour peinture du commerce (Colours, Templemars, France). Le mélange était soigneusement réalisé afin d'éviter la formation de bulles d'air.

A l'aide d'une seringue, le latex coloré était injecté par le cathéter en exerçant une pression constante sur le piston. L'injection était stoppée lorsqu'une surpression était ressentie sur le piston. Immédiatement après, de l'acide acétique dilué à 50% était injecté par le cathéter permettant la solidification du latex. Le rapport volume de latex / volume d'acide acétique 50% était de 20/3. Le sujet était ensuite conservé à 4°C et le genou était prélevé à 24 heures après l'injection.

#### 3) Technique d'injection à la gélatine colorée à l'encre de Chine

Le mélange injecté était de la gélatine colorée à l'encre de Chine (30g de gélatine pour 1 litre d'eau déminéralisé, ; Gelatin from porcine skin, Sigma, France ; Indian Ink, Jacksons, UK). Le mélange était soigneusement préparé afin d'éviter la formation de bulles d'air.

La préparation était injectée dans le cathéter à l'aide d'une seringue jusqu'à ce que la peau se colore en noir de manière homogène. Le cathéter était ensuite clampé. Les fuites au niveau de l'incision étaient clampées par des pinces d'Halstead. Le sujet était ensuite conservé à 4°C et le genou était prélevé à 24 heures après l'injection

#### 4) Technique d'injection au sulfate de baryum

Afin d'étudier la vascularisation intra-méniscale par microtomodensitométrie, les genoux étaient injectés par un mélange radio-opaque à base de sulfate de baryum et de gélatine (50% sulfate de baryum, Micropaque<sup>\*</sup>, Guerbet, France ; 1,5% gélatine, Gelatin from porcine skin, Sigma, France). Le mélange était coloré avec de l'encre de Chine. La technique d'injection était la même que l'injection à la gélatine colorée précédemment décrite. Le sujet était ensuite conservé à 4°C pendant 24 heures puis le genou était prélevé.

# III - Étude anatomique des artères articulaires du genou

Sur les 23 genoux utilisés, 20 genoux (7 droits et 13 gauches) ont été sélectionnés pour étudier le réseau artériel péri-articulaire du genou dans l'optique d'analyser la vascularisation méniscale (2 genoux exclus pour échec d'injection à la gélatine colorée jusqu'aux artères articulaires, 1 exclu car le tissu synovial était très inflammatoire lors de la dissection). L'âge moyen des sujets anatomiques était de 82,7 ans (de 56 à 97 ans). 10 genoux étaient injectés par du latex-néoprène et 10 genoux étaient injectés par de l'encre de Chine gélatinée.

L'artère poplitée était soigneusement disséquée en conservant toutes ses branches. Puis les différentes branches articulaires collatérales étaient disséquées de leurs origines jusqu'à leurs terminaisons antérieures péri-patellaires (artère supéro-médiale, artère inféromédiale, artère supéro-latérale, artère inféro-latérale, les portions extra-capsulaires des artères articulaires moyennes). Chaque structure anatomique en rapport avec ces artères (musculo-tendineuse, capsulo-ligamentaire et osseuse) était conservée. Le calibre des artères articulaires était mesuré à leurs origines grâce à une réglette et un pied à coulisse (Wilmart-, précision 0,02mm, Libercourt, France)

L'ensemble des constituants composant le réseau artériel péri-méniscal médial et latéral appelé arcade péri-méniscale médiale et latérale était décrit sur chaque genou. Les anastomoses entre les artères articulaires étaient également rapportées.

Dans un deuxième temps, le genou était désarticulé afin d'étudier les portions intracapsulaires des artères articulaires moyennes. Pour cela, le quadriceps était décollé du fémur et la patella était réclinée vers le bas. Les ligaments collatéraux étaient désinsérés du fémur et la capsule articulaire était ouverte longitudinalement en prenant soin de conserver les artères articulaires. Enfin les ligaments croisés étaient désinsérés du fémur afin de désarticuler le genou et d'observer les artères intra-capsulaires. Les artères articulaires moyennes étaient disséquées sous loupes au travers de la capsule articulaire jusqu'à leurs terminaisons grâce à des instruments de microchirurgie (loupe chirurgicale : Carl Zeiss-Meditec Oberkochen Germany).

# IV - Étude de la vascularisation terminale des ménisques

#### 1) Étude anatomique

6 genoux ont été injectés à la gélatine colorée en plus des 10 genoux utilisés précédemment. Sur les 16 genoux utilisés, 6 genoux (3 droites et 3 gauches) ont été sélectionnés pour étudier la vascularisation intra-méniscale. Toutes les pièces incluses étaient injectées à la gélatine colorée à l'encre de Chine (10 genoux exclus pour échec de l'injection jusqu'au réseau centro-méniscal ou jusqu'aux réseaux sous synoviaux). L'âge moyen des sujets anatomiques était de 79 ans (de 58 à 96 ans).

Le protocole de dissection était le même que pour l'étude des artères articulaires du genou. Une attention toute particulière était portée au réseau capillaire méniscal provenant des arcades péri-méniscales afin d'observer le réseau capillaire périphérique, le réseau sous synovial. Enfin des coupes radiaires dans les segments antérieurs, moyens et postérieurs des ménisques étaient réalisées afin d'étudier le réseau centro-méniscal.

#### 2) Étude histologique des ménisques

L'étude histologique des ménisques a été réalisée à la plateforme histologique du laboratoire RMeS (Regenerative Medicine and Skeleton, Unité Inserm UMRS-1229, Faculté d'Odontologie, Université de Nantes).

Sur les 6 ménisques issus de 3 genoux frais, 5 ménisques (3 ménisques médiaux, 2 ménisques latéraux) ont été selectionnés (2 ménisques issus d'une pièce anatomique de 76 ans, 3 ménisques pédiatriques provenant de pièces opératoires : 2 ménisques d'un enfant de 7 ans et un ménisque médial d'un enfant de 11 ans, le ménisque latéral n'a pas pu être utilisé). Trois segments étaient prélevés sur chaque ménisque (antérieur, moyen et postérieur). Au total : 15 segments de ménisques ont été étudiés.

Après fixation au paraformaldéhyde 4% puis décalcification au TBD-2 (TBD-2 Decalcifier, Thermo Fisher Scientific, USA) pendant 48 heures, les segments méniscaux étaient inclus en paraffine (Paraffine, VWR Chemicals, France). Puis des coupes radiaires d'épaisseur 7µm étaient réalisées à 2 niveaux différents pour chaque segment au microtome (RM2255, Leica, Germany). Une coloration topographique hématoxyline – éosine (HE) était réalisée par un automate de coloration afin d'étudier le tissu méniscal dans son ensemble (automate : Microm STP 120 Spin Tissue Processor, Thermo Fischer Scientific, USA). Enfin une coloration immuno-histochimique marquant la protéine CD31 spécifique de l'endothélium permettait d'apprécier la vascularisation intra-méniscale (anticorps anti-CD31, Abcam, France).

L'ensemble des coupes a été numérisé (Hamamatsu, Japon) et analysé à l'aide du logiciel NDP.view2<sup>+</sup> (NDP.view2<sup>+</sup>, Macintosh, USA).

Pour chaque coupe radiaire, l'étendue de la vascularisation intra-méniscale a été évaluée en calculant le rapport entre la distance « bord périphérique – vaisseaux » et la distance « bord périphérique – bord libre ». Le rapport était ensuite exprimé en pourcentage.

# V - Analyse microtomodensitométrique de la vascularisation intra-méniscale

L'étude microtomodensitométrique de la vascularisation intra-méniscale et sa reconstruction 3D ont été réalisées au laboratoire RMeS. Sur les 6 genoux injectés au sulfate de baryum, 5 genoux ont été sélectionnés (3 genoux gauches, 2 genoux droits). Un genou était exclu pour défaut d'injection. L'âge moyen des sujets anatomiques était de 82 ans (78 à 86 ans).

Les genoux injectés au sulfate de baryum étaient congelés à -20°C pendant 3 jours. Puis, des coupes transversales successives étaient réalisées à la scie à ruban de façon à ce que l'épaisseur des pièces ne contienne plus que les ménisques, la partie la plus distale des condyles fémoraux et la partie la plus proximale des condyles tibiaux (scie à ruban L = 2910mm, Medoc SA, Logrono, Spain). Les condyles fémoraux étaient ensuite retirés (*Fig. 13*), les ligaments ménisco-tibiaux étaient sectionnés et les ménisques étaient prélevés en conservant la totalité de la capsule articulaire et le tissu graisseux sous cutané. Après une fixation au paraformaldéhyde 4% pendant 24 heures, les ménisques étaient plongés dans de l'acide phosphotungstique 2% pendant 16 heures à 4°C (Acide phosphotungstique, Sigma-Aldrich, USA). L'imprégnation par l'acide phosphotungstique 2% permettait une légère prise de contraste homogène du ménisque de telle sorte qu'il soit visible en microtomodensitométrie mais qu'il n'empêche pas l'analyse de la vascularisation intraméniscale.

Les ménisques étaient coupés en 2 segments (antérieur et postérieur) afin d'être analysés au microscanner (skyscan-1272 X-ray microtomograph, Bruker microCT, Belgium ; temps d'exposition : 1420ms, résolution : 18 $\mu$ , pas de rotation sur 180° : 0,71°, filtre cuivre 0,11mm, 100kV, 100  $\mu$ A). Les reconstructions étaient réalisées avec les logiciels CTVox et Dataviewer (CTVox 3.3.0, Dataviewer 1.5.6.2, Bruker microCT, Belgium).


**Fig. 13** Vue crâniale de la coupe transversale d'une pièce injectée au sulfate de baryum. Les condyles fémoraux ont été retirés. Ce mode de prélèvement des ménisques permettait de s'assurer de ne pas léser le réseau capillaire vascularisant les ménisques (MM : ménisque médial, ML : ménisque latéral, Pt : tendon poplité, P : patella, H : ligament adipeux de Hoffa)

# I - Origine de la vascularisation méniscale : les artères articulaires

# A. Description des artères articulaires

1) Artère articulaire supéro-latérale

L'artère articulaire supéro-latérale était présente sur tous les genoux disséqués. Elle naissait au bord latéral de l'artère poplitée en regard de la métaphyse distale du fémur, au dessus des condyles *(Fig. 14).* Dans la moitié des cas (10/20), l'artère articulaire supéro-latérale était la première artère articulaire émergeant de l'artère poplitée.

Son trajet était constant. Elle longeait la partie crâniale de la coque condylienne latérale en passant au dessus de l'insertion du chef latéral du muscle gastrocnémien et en dedans du tendon du muscle biceps fémoral. Puis rapidement, l'artère articulaire supérolatérale longeait la partie latérale de la métaphyse distale du fémur *(Fig. 15)*, d'arrière en avant, au dessus du ligament collatéral latéral, puis se terminait par de fines branches suprapatellaires, s'anastomosant avec son homologue supéro-médiale et participant au réseau anastomotique péri-patellaire.

L'artère articulaire supéro-latérale donnait des branches musculaires (muscles biceps fémoral et vaste latéral) mais surtout des branches osseuses destinées au condyle fémoral latéral.



**Fig. 14** Vue postérieure d'un genou droit injecté au latex-néoprène : vue d'ensemble. Visualisation de l'artère poplitée et de l'origine des artères articulaires. Sur ce sujet, l'artère capsulo-méniscale médiale provenait de l'artère articulaire inféro-médiale

#### 2) Artère articulaire supéro-médiale

L'artère articulaire supéro-médiale était présente sur tous les genoux disséqués. De plus petit calibre que son homologue supéro-latérale, elle naissait au bord médial de l'artère poplitée, au dessus des condyles fémoraux *(Fig. 14).* Dans la moitié des cas (10/20), l'artère articulaire supéro-médiale était la première artère articulaire émergeant de l'artère poplitée.

Son trajet était constant. Elle longeait la partie crâniale de la coque condylienne médiale, au dessus de l'insertion du chef médial du muscle gastrocnémien *(Fig. 15)* en

dedans des tendons des muscles semi-membraneux et semi-tendineux. L'artère articulaire supéro-médiale longeait ensuite la partie médiale de la métaphyse distale du fémur, au dessus du ligament collatéral médial. Elle se terminait par des branches s'anastomosant avec l'artère supéro-latérale au dessus de la patella participant ainsi au réseau anastomotique péri-patellaire.

L'artère articulaire supéro-médiale donnait des branches musculaires (muscles semi-tendineux, semi-membraneux et vaste médial) ainsi que des branches osseuses pour le condyle fémoral médial. Elle donnait dans tous les cas des branches collatérales s'anastomosant avec l'artère articulaire inféro-médiale et l'artère capsulo-méniscale médiale participant ainsi à la vascularisation caspulo-méniscale médiale.



**Fig. 15** Vues latérale (a) et médiale (b) d'un genou droit injecté au latex-néoprène : visualisation des artères articulaires. a) L'artère articulaire supéro-latérale était au contact de la métaphyse fémorale distale. L'artère articulaire inféro-latérale passait en arrière du tendon du muscle poplité, puis longeait le mur méniscal latéral en passant sous le ligament collatéral latéral qui a été réséqué. b) L'artère articulaire inféro-médiale était au contact de la métaphyse tibiale proximale en passant sous le ligament collatéral médial qui a été réséqué. Elle ne longeait pas le mur méniscal médial. Sur ce genou, l'artère articulaire supéro-médial n'a pas été retrouvée. C'est l'artère descendante du genou qui vascularisait le territoire théorique de l'artère supéro-médiale (LCL : ligament collatéral latéral, LCM : ligament collatéral médial, ML : ménisque latéral, MM : ménisque médial, Pt : tendon du muscle poplité)

#### 3) Artère articulaire inféro-latérale

L'artère articulaire inféro-latérale était présente sur tous les genoux disséqués. Elle émergeait dans 95% des cas du bord latéral de l'artère poplitée (19/20), entre l'interligne articulaire fémoro-tibiale au dessus et le muscle poplité en dessous *(Fig. 14)*. Dans un cas, elle naissait de l'artère tibiale antérieure *(Fig. 16)*.

Son trajet était constant. Elle longeait l'interligne articulaire fémoro-tibiale latérale en passant entre le muscle poplité en avant et le chef latéral du muscle gastrocnémien en arrière, puis entre le ligament collatéral latéral en dehors et la capsule articulaire en dedans *(Fig. 15).* Elle se terminait sous le ligament patellaire par des branches s'anastomosant avec l'artère articulaire inféro-médiale et participant au réseau anastomotique péri-patellaire.

L'artère articulaire inféro-latérale donnait quelques branches musculaires de petit calibre pour le chef latéral du muscle gastrocnémien, le muscle soléaire et le muscle poplité. Elle donnait de nombreuses branches capsulo-méniscales latérales constituant ainsi l'arcade péri-méniscale latérale, ainsi que des branches participant à la vascularisation du ligament adipeux du genou. Enfin, certaines branches terminales étaient destinées à la corne antérieure du ménisque latéral ainsi qu'à l'insertion tibiale du LCA.



**Fig. 16** Vue postéro-latérale d'un genou gauche injecté au latex-néoprène. L'artère articulaire supérolatérale longeait la métaphyse fémorale distale en passant au dessus de l'insertion fémorale du gastrocnémien latéral. Sur cette pièce, il existait une variation du trajet de l'artère tibiale antérieure qui naissait au dessus du muscle poplité et qui passait ensuite en avant. Ici, l'artère inféro-latérale provenait de l'artère tibiale antérieure. Elle longeait ensuite le mur méniscal latéral. (LCL : ligament collatéral latéral, biceps fem. : biceps fémoral).

#### 4) Artère articulaire inféro-médiale

L'artère articulaire inféro-médiale était présente dans 90% des cas (18/20). De calibre très variable d'un genou à l'autre, elle émergeait du bord médial de l'artère poplitée, entre l'interligne articulaire fémoro-tibiale au dessus et le muscle poplité en dessous (*Fig. 14*).

Son trajet était constant. Elle se dirigeait vers le bas, l'avant et le dedans en longeant le bord crânial du muscle poplité. Elle passait en dessous de l'insertion tendineuse du muscle semi-membraneux et de l'insertion tibiale du ligament collatéral médial. Elle longeait la face antéro-médiale de la métaphyse tibiale proximale *(Fig. 15)*. Elle se terminait sous le ligament patellaire par des branches s'anastomosant avec son homologue inféro-latérale et participant au réseau anastomotique péri-patellaire.

L'artère articulaire inféro-médiale donnait des branches musculaires pour le chef médial du muscle gastrocnémien et le muscle poplité. Elle donnait également de nombreuses branches collatérales ascendantes s'anastomosant avec l'artère capsulo-méniscale médiale ainsi que des branches participant à la vascularisation du ligament adipeux du genou (Hoffa). Enfin, certaines branches terminales participaient à la vascularisation de la corne antérieure du ménisque médial et à l'insertion tibiale du ligament croisé antérieur.

#### 5) Artères articulaires moyennes

Une à deux artères articulaires moyennes ont été retrouvées lors de nos dissections *(Fig. 17).* Chaque artère articulaire moyenne avait une topographie semblable d'un genou à un autre et pénétrait rapidement la capsule articulaire postérieure. La plus proximale était la plus volumineuse. La deuxième, lorsqu'elle était présente, était de plus petit calibre. Par souci de compréhension nous avons donc nommé :

- **L'artère articulaire moyenne principale** : celle qui était la plus proximale, de plus gros calibre
- **L'artère articulaire moyenne accessoire** : celle qui était inconstante, de plus petit calibre.



*Fig.* 17 Vue postéro-médiale d'un genou gauche injecté au latex-néoprene. Sur ce genou, 2 artères articulaires moyennes ont été observées. La plus proximale, l'artère articulaire moyenne principale, était la plus volumineuse. La deuxième, l'artère articulaire moyenne accessoire, était inconstante et de plus petit calibre. Une 3<sup>e</sup> artère, l'artère capsulo-méniscale médiale, naissant entre les 2 artères articulaires moyennes, longeait le mur du ménisque médial (Grd add : tendon du grand adducteur, semi-memb : tendon du semi-membraneux)

#### a. Artère articulaire moyenne principale

Retrouvée sur toutes nos dissections, elle émergeait de l'artère poplitée dans 60% des cas (12/20), sous les artères articulaires supérieures. Elle naissait de l'artère articulaire supéro-latérale dans 25% des cas (5/20) et de l'artère articulaire supéro-médiale dans 15% des cas (3/20).

Rapidement, l'artère articulaire moyenne principale traversait la capsule articulaire postérieure à proximité du condyle fémoral latéral à travers le tendon récurrent du muscle semi-membraneux dans 60% des cas (12/20). Dans 40% des cas (8/20), elle traversait la capsule au dessus du tendon récurrent *(Fig. 18 a)*. Elle se divisait ensuite en de nombreuses branches *(Fig. 18 b)* :

- Des branches antérieures passant entre les ligaments croisés antérieur et postérieur, vascularisant leurs corps, le pied du ligament croisé antérieur, les cornes méniscales antérieures et le ligament adipeux du genou.
- Des branches postérieures vascularisant le ligament croisé postérieur et les cornes méniscales postérieures.



**Fig. 18** Vues postérieure (a) et antérieure (b) d'un genou gauche injecté au latex-néoprène. a) L'artère articulaire moyenne principale était la plus volumineuse des artères articulaires moyennes. Elle traversait la capsule articulaire postérieure en passant soit au dessus du tendon récurrent du semimembraneux, soit à travers ce dernier comme décrit sur d'autres dissections. b) La flexion du genou à 90° permettait d'apprécier les nombreuses branches de l'artère articulaire moyenne principale qui vascularisaient l'ensemble des éléments présents dans l'échancrure : les ligaments croisés,, les cornes méniscales et le ligament adipeux du genou. (T. récurr. semi-memb : tendon récurrent du semimembraneux; LCA : ligament croisé antérieur, LCP : ligament croisé postérieur)

#### b. Artère articulaire moyenne accessoire

Inconstante, l'artère articulaire moyenne accessoire était retrouvée dans 55% des cas (11/20). Elle provenait de l'artère poplitée dans 64% des cas (7/11). Dans 36% des cas (4/11), elle naissait de l'artère capsulo-méniscale médiale.

Lorsqu'elle était présente, elle se dirigeait vers l'avant et traversait la capsule articulaire postérieure, sous le tendon récurrent du muscle semi-membraneux. Puis elle donnait de nombreuses branches perforantes à destinée des cornes méniscales postérieures *(Fig. 19).* 

#### 6) Artère capsulo-méniscale médiale

Située sous l'artère articulaire moyenne principale, une artère était retrouvée sur tous les genoux disséqués. Initialement assimilée comme une artère articulaire moyenne, celle-ci s'en distinguait par son trajet exclusivement extra-capsulaire. Elle longeait la capsule articulaire médiale, à hauteur du mur méniscal. Nous l'avons donc nommé : **artère capsuloméniscale médiale.** 

De petit calibre, elle provenait de l'artère poplitée dans 80% des cas (16/20), juste au dessus des artères articulaires inférieures et de l'artère articulaire moyenne accessoire lorsqu'elle était présente. Elle naissait de l'artère articulaire inféro-médiale dans 15% des cas (3/20) (*Fig. 14*), ou de l'artère articulaire moyenne principale dans 5% des cas (1/20).

Son trajet était constant et exclusivement extra-capsulaire *(Fig. 19).* Elle se dirigeait vers le dedans, à hauteur de l'interligne articulaire fémoro-tibiale médiale. Elle passait sous le tendon du muscle semi-membraneux pour ensuite être adhérent à la capsule articulaire et au ligament collatéral médial, à hauteur du mur méniscal médial.

Sur son trajet, elle donnait des branches perforantes vascularisant le ménisque médial. Elle se terminait par de fines branches s'anastomosant avec les artères articulaires inférieures et participait ainsi au réseau anastomotique péri-patellaire.



**Fig. 19** Vue supéro-postéro-médiale d'un genou gauche injecté au latex-néoprène. L'artère articulaire moyenne accessoire était inconstante et a été retrouvée dans 55% des cas. Lorsqu'elle était présente, elle traversait la capsule sous le tendon récurrent du semi-membraneux pour aller vasculariser les cornes méniscales postérieures. L'artère capsulo-méniscale médiale longeait le mur méniscal sur sa totalité. De petit calibre, elle était retrouvée sur toutes les dissections (LCA : ligament croisé antérieur, LCP : ligament croisé postérieur)

Le schéma et le tableau ci dessous récapitulent l'ensemble des descriptions des artères articulaires moyennes et de l'artère capsulo-méniscale médiale.



b)	Origine	Trajet	Terminaison	
A. articulaire moyenne principale	60% : a. poplitée 25% : a. supéro-latérale 15% : a. supéro-médiale	<ul> <li>Traversait la capsule articulaire</li> <li>60% à travers le tendon récurrent du semi-membraneux</li> <li>40% au dessus du tendon récurrent du semi-membraneux</li> <li>Nombreuses artères dans l'échancrure</li> </ul>	<ul> <li>cornes méniscales antérieures et postérieures</li> <li>LCA</li> <li>LCP</li> <li>ligament adipeux du genou</li> </ul>	
A. articulaire moyenne accessoire (présente dans 55%)	64% : a. poplitée 36% : a. capsulo-méniscale médiale	Traversait la capsule articulaire sous le tendon récurrent du semi-membraneux	- cornes méniscales postérieures	
A. capsulo-méniscale médiale	80% ; a. poplitée 15% : a. inféro-médiale 5% : a. moyenne principale	Longeait la capsule articulaire en regard du mur méniscal médial	<ul> <li>branches perforantes</li> <li>méniscales</li> <li>réseau anastomotique péri-</li> <li>patellaire et ligament adipeux du</li> <li>genou</li> </ul>	

*Fig. 20* a) Schéma en vue postérieure d'un genou droit décrivant les artères articulaires moyennes et l'artère capsulo-méniscale médiale. b) Tableau récapitulatif résumant la description des artères articulaires moyennes et de l'artère capsulo-méniscale médiale.

# B. Anastomoses et arcades péri-méniscales

#### 1) Anastomoses entre les artères articulaires

Il existe de nombreuses anastomoses entre les artères articulaires. Ces anastomoses ont été retrouvées lors de nos dissections.

#### Anastomoses antérieures

Elles étaient très nombreuses et participaient à la constitution du réseau anastomotique péri-patellaire. L'artère articulaire inféro-médiale, inféro-latérale et l'artère capsulo-méniscale médiale s'anastomosaient en arrière du ligament adipeux du genou et en avant du ligament inter-méniscal *(Fig. 21).* Elles s'anastomosaient également avec des branches antérieures de l'artère articulaire moyenne principale, à hauteur des cornes méniscales antérieures *(Fig. 22).* Les artères articulaires supéro-médiale et supéro-latérale s'anastomosaient au dessus la patella, en arrière du tendon quadricipital.

#### Anastomoses médiales

De nombreuses anastomoses ont été retrouvées entre l'artère capsulo-méniscale médiale, l'artère articulaire supéro-médiale et l'artère articulaire inféro-médiale *(Fig. 21).* L'artère descendante du genou participait également à ce réseau anastomotique.



**Fig. 21** Vue antéro-médiale d'un genou droit injecté au latex-néoprène L'appareil extenseur ainsi que le ligament adipeux du genou ont été réséqués dans leur totalité. Les flèches jaunes indiquent des anastomoses antérieures (entre les artères articulaires inféro-latérale, inféro-médiale et l'artère capsulo-méniscale médiale) et des anastomoses médiales (entre les artères articulaires supéro-médiale, inféro-médiale et l'artère capsulo-méniscale médiale) (LIM : ligament inter-méniscal)



**Fig. 22** Vue antérieure d'un genou droit injecté à la gélatine colorée. Le fémur, l'appareil extenseur et le ligament graisseux du genou ont été réséqués dans leur totalité. Les flèches jaunes indiquent de nombreuses anastomoses entre les artères articulaires inféro-latérale, inféro-médiale moyenne principale et l'artère capsulo-méniscale médiale (LCA : ligament croisé antérieur)

#### Anastomoses latérales

Beaucoup moins denses que sur le versant médial du genou, des anastomoses entre les artères articulaires supéro-latérale et inféro-latérale ont été mises en évidence dans 70% des cas (*Fig. 23*).



*Fig. 23 Vue latérale d'un genou droit injecté à la gélatine colorée. La flèche jaune objective une anastomose latérale entre l'artère articulaire supéro-latérale et l'artère articulaire inféro-latérale* 

Ainsi, ce réseau artériel constitue un cercle anastomotique péri-articulaire entourant les interlignes fémoro-tibiales médiale et latérale d'arrière en avant. C'est ce cercle anastomotique qui vascularise les ménisques et est nommé à ce titre « arcades péri-méniscales médiale et latérale ».

#### 2) Arcade péri-méniscale latérale

L'arcade péri-méniscale latérale était essentiellement constituée de l'artère articulaire inféro-latérale qui longeait le mur méniscal latéral d'arrière en avant jusqu'à la corne méniscale antérieure où elle s'anastomosait avec l'artère articulaire moyenne principale *(Fig. 24a, Fig. 25)*. Ainsi, l'artère articulaire inféro-latérale vascularisait l'ensemble du ménisque latéral. Les cornes méniscales étaient aussi vascularisées par l'artère articulaire moyenne principale. Enfin, la corne méniscale postérieure était également vascularisée par l'artère articulaire moyenne accessoire lorsque celle ci était présente.

#### 3) Arcade péri-méniscale médiale

De plus petit calibre que son homologue contro-latérale et plus difficile à décrire du fait des nombreuses anastomoses médiales, l'arcade péri-méniscale médiale était surtout constituée par l'artère capsulo-méniscale médiale qui longeait le mur méniscal médial d'arrière en avant jusqu'à la corne méniscale antérieure *(Fig. 24b, Fig. 25).* Elle s'anastomosait à ce niveau avec l'artère articulaire moyenne principale. Ainsi, l'artère capsulo-méniscale médiale vascularisait l'ensemble du ménisque médial. Comme leurs homologues latérales, les cornes méniscales étaient aussi vascularisées par l'artère articulaire moyenne principale. Enfin, la corne méniscale postérieure était également vascularisée par l'artère articulaire moyenne accessoire lorsque celle ci était présente.



**Fig. 24** Vues latérale (a) et médiale (b) des arcades péri-méniscales issues d'un genou gauche injecté au latex-néoprène. a) L'arcade péri-méniscale latérale était essentiellement constituée de l'artère articulaire inféro-latérale. b) L'arcade péri-méniscale médiale était de plus petit calibre que son homologue contro-latérale. Elle était constituée de l'artère capsulo-méniscale médiale qui s'anastomosait (flèches jaunes) avec les artères articulaires supéro-médiale et inféro-médiale. (ML : ménisque latéral, MM : ménisque médial)



**Fig. 25** Vue crâniale des arcades péri-méniscales issues d'un genou gauche injecté au latex-néoprène. Les 2 arcades péri-méniscales s'anastomosaient en avant. Elles s'anastomosaient également avec l'artère articulaire moyenne principale au niveau des cornes méniscales antérieures. L'artère articulaire moyenne accessoire était visible sur cette pièce et vascularisait les cornes méniscales postérieures. (ML : ménisque latéral, MM : ménisque médial)

Les schémas et le tableau des figures 26 et 27 résument la description du cercle anastomotique péri-articulaire et les composants des arcades péri-méniscales médiales et latérales.



*Fig. 26 Schéma en vue antérieure du cercle anastomotique péri-articulaire d'un genou droit. Description des arcades péri-méniscales médiale et latérale (ML : ménisque latéral, MM : ménisque médial)* 



b)	Arcade péri-méniscale médiale	Arcade péri-méniscale latérale		
Artères constituant l'arcade	<ul> <li>artère capsulo-méniscale médiale (come antérieure, corps, corps postérieure)</li> <li>artère articulaire moyenne principale (corne antérieure, corne postérieure)</li> <li>artère articulaire moyenne accessoire (corne postérieure)</li> </ul>	<ul> <li>artère articulaire inféro-latérale (corne antérieure, corps, corps postérieure)</li> <li>artère articulaire moyenne principale (corne antérieure, corne postérieure)</li> <li>artère articulaire moyenne accessoire (corne postérieure)</li> </ul>		
Anastomoses avec	<ul> <li>artère articulaire supéro-médiale</li> <li>artère articulaire inféro-médiale</li> <li>artère articulaire inféro-latérale</li> </ul>	<ul> <li>artère articulaire supéro-latérale</li> <li>(70%)</li> <li>artère capsulo-méniscale médiale</li> </ul>		

*Fig. 27* a) Schéma en vue crâniale des arcades péri-méniscales médiale et latérale. b) Tableau récapitulatif résumant les constituants des arcades péri-méniscales

# II - La vascularisation méniscale terminale : étude anatomique

La vascularisation méniscale terminale a été étudiée grâce à la dissection de pièces anatomiques préalablement injectées à la gélatine colorée à l'encre de Chine. Lorsque cette injection était réussie, l'ensemble des artérioles et des capillaires constituant la vascularisation méniscale terminale a pu être décrite. Plusieurs types de réseaux vasculaires ont été retrouvés :

- Un réseau périphérique,
- Deux réseaux sous synoviaux, (crânial et caudal)
- Un réseau centro-méniscal.

## A. Réseau périphérique

Le réseau périphérique était un réseau qui bordait les murs méniscaux (*Fig. 28*). Il provenait d'artères radiaires issues des arcades péri-méniscales. Des artères ascendantes ou descendantes, provenant des arcades péri-méniscales donnaient également des artères radiaires qui alimentaient le réseau périphérique (*Fig. 29-30*). Les murs méniscaux médiaux et latéraux étaient vascularisés par ce réseau périphérique, à l'exception de la portion du mur méniscal latéral située dans le hiatus poplité qui était avasculaire (*Fig. 29*).



*Fig. 28* Vue antérieure d'un ménisque médial issu d'un genou gauche injecté à la gélatine colorée. Les artères radiaires et les artères ascendantes ou descendantes n'ont pas été conservées permettant de visualiser le réseau périphérique (MM : ménisque médial)



**Fig. 29** Vue postéro-latérale d'un ménisque latéral issu d'un genou gauche injecté à la gélatine colorée. Les arcades méniscales donnaient des branches radiaires et ascendantes constituant un réseau périphérique le long du mur méniscal. Il existait une zone avasculaire sur le mur méniscal latéral, zone située dans le hiatus poplité



*Fig.* **30** Vue médiale d'un ménisque et d'un tibia issus d'un genou gauche injecté à la gélatine colorée. Le ligament collatéral médial a été réséqué, l'artère capsulo-méniscale médiale n'a pas été conservée. Des branches ascendantes issues de l'artère articulaire inféro-médiale et s'anastomosant avec l'artère articulaire supéro-médiale et l'artère capsulo-méniscale médiale alimentaient le réseau périphérique

#### B. Réseau sous-synovial

Le réseau sous-synovial était un réseau vasculaire situé sur les faces crâniales et caudales des ménisques. Il ne recouvrait que la partie la plus périphérique des ménisques à la jonction capsulo-méniscale, sur 2 à 3mm (*Fig. 31*).

Ce fin réseau vasculaire était alimenté par des artérioles provenant du réseau périphérique, mais également par la vascularisation de la membrane synoviale du genou *(Fig. 32).* Le réseau sous synovial des cornes méniscales semblait aussi dense que le réseau sous synovial des corps méniscaux. Le réseau sous synovial s'étendait sur la totalité des freins méniscaux (**Fig. 33**a).

Sur l'ensemble de nos dissections, 2 zones n'étaient pas recouvertes par le réseau sous-synovial *(Fig. 31 et 33b)* :

- Sur le ménisque latéral : la face crâniale en rapport avec le hiatus poplité, non recouverte de tissu synovial, était avasculaire. Le réseau sous-synovial à la face caudale semblait vasculariser l'ensemble du ménisque latéral, y compris la zone en rapport avec le tendon poplité.
- Sur le ménisque médial : la partie postérieure du réseau sous-synovial du ménisque médial semblait moins dense, avec notamment une zone avasculaire située à la jonction ménisco-capsulaire entre la membrane synoviale et la corne postérieure du ménisque.



*Fig. 31* Vue crâniale d'un genou gauche injectée à la gélatine colorée. Visualisation du réseau sous synovial des faces crâniales des ménisques. Il existait 2 zones indemnes du réseau sous-synovial : la face crâniale du ménisque latéral en rapport avec le hiatus poplité et la face crâniale de la partie postérieure du ménisque médial (ML : ménisque latéral, MM : ménisque médial)



**Fig. 32** a) Vue latérale d'un ménisque latéral issu d'un genou gauche injecté à la gélatine colorée. Le réseau périphérique donnait des branches qui participaient à la constitution du réseau sous-synovial. b) Vue antérieure d'un ménisque médial issu d'un genou gauche injecté à la gélatine colorée. Après résection du fémur, la membrane synoviale a été réclinée vers le bas. Le réseau sous-synovial était également alimenté par la vascularisation de la membrane synoviale (ML : ménisque latéral, MM : ménisque médial)



**Fig. 33** a) Vue ventro-crâniale d'un ménisque latéral d'un genou gauche injecté à la gélatine colorée. Les freins méniscaux étaient intégralement recouverts par le réseau sous synovial. b) Vue caudale des ménisques issus d'un genou gauche injecté à gélatine colorée. La partie la plus périphérique de la surface caudale du ménisque latéral était recouvert par le réseau sous-synovial. La partie postérieure de la surface caudal du ménisque médial était indemne du réseau sous-synovial (ML : ménisque latéral, MM : ménisque médial)

## C. Réseau centro-méniscal

Les coupes radiaires et circonférentielles des ménisques issus de genoux injectés à la gélatine colorée ont permis de visualiser le réseau centro-méniscal. Ce réseau semblait provenir du réseau périphérique. Il existait également des artérioles intra-méniscales provenant des réseaux sous-synoviaux.

Le réseau centro-méniscal était surtout constitué d'artérioles radiaires horizontales situées dans la lame de fasciculation des ménisques. Elles prenaient leur origine à la périphérie, et se dirigeait vers le bord libre en longeant les fibres de collagène de la lame de fasciculation *(Fig. 34)*. D'autres artérioles radiaires de plus petits calibres et souvent très courtes, naissaient à la périphérie du ménisque au dessus ou en dessous de la lame de fasciculation.

Les coupes circonférentielles du 1/3 périphérique des ménisques ont montré de très rares vaisseaux qui longeaient les fibres circonférentielles de collagène (*Fig. 35*). Il semblait exister un fin réseau circonférentiel anastomosant différentes artérioles centro-méniscales entre elles.



**Fig. 34** Coupe radiaire d'un ménisque médial issu d'un genou droit injecté à la gélatine colorée. Visualisation du réseau centro-méniscal composé d'une artériole centro-méniscale située au sein des fibres de collagène dans la lame de fasciculation. D'autres artérioles centro-méniscales étaient situées au dessus ou en dessous de la lame de fasciculation. Les artérioles centro-méniscales ne semblaient présentes que dans le 1/3 périphérique des ménisques (MM : ménisque médial)



*Fig. 35* Segments de ménisques issus d'un genou gauche injecté à la gélatine colorée a) Vue supérieure d'un segment de ménisque médial. Visualisation du réseau sous-synovial crânial ainsi qu'une artériole intra-méniscale circonférentielle, constituant très probablement des anastomoses entre les artérioles centro-méniscales. b) Coupe circonférentielle d'un ménisque latéral à la jonction 1/3 périphérique - 2/3 centraux. De fines artérioles circonférentielles étaient localisées dans la lame de fasciculations. D'autres artérioles intra-méniscales étaient issues du réseau sous-synovial (ML : ménisque latéral, MM : ménisque médial)

Sur la totalité des ménisques latéraux et médiaux disséqués, les réseaux centroméniscaux n'ont été observés que dans le 1/3 périphérique des ménisques (jusqu'à 33% de la périphérie). La densité du réseau centro-méniscal ne semblait pas varier entre la corne antérieure, le corps et la corne postérieure *(Fig. 36).* 



*Fig. 36* Coupes radiaires d'une corne antérieure (a), d'un corps (b) et d'une corne postérieure (c) d'un ménisque médial issu d'un genou gauche injecté à la gélatine colorée. Visualisation d'artérioles centroméniscales située dans le 1/3 périphérique du ménisque

# III - Étude histologique

# A. Vascularisation intra-méniscale chez l'adulte

L'étude immunohistochimique par marquage de la protéine CD31 spécifique de l'endothélium permettait d'apprécier la vascularisation intra-méniscale. Bien que le ménisque soit un tissu fibro-cartilagineux faiblement vascularisé, il était possible par cette technique de mettre en évidence une vascularisation intra-méniscale.

Dans le ménisque, la vascularisation était répartie en 3 réseaux (Fig. 37) :

- Au sein de la lame de fasciculation, correspondant au réseau centro-méniscal
- Au sein du bourrelet de glissement crânial, correspondant très probablement au réseau sous-synovial crânial
- Au sein du bourrelet de glissement caudal, correspondant très probablement au réseau sous-synovial caudal.

La vascularisation s'étendant de la périphérie vers le bord libre du ménisque, la densité des vaisseaux était plus importante à la périphérie du ménisque. Puis, plus on s'éloignait de la périphérie du ménisque, plus la vascularisation méniscale se raréfiait pour être complètement absente dès la partie moyenne du ménisque.



**Fig. 37** Coupe immunohistochimique d'un segment antérieur d'un ménisque latéral adulte. Marquage CD31. a) Il existe 3 réseaux vasculaires intra-méniscaux : le réseau centro-méniscal dans la lame de fasciculation, le réseau sous-synovial crânial dans le bourrelet de glissement crânial et le réseau sous-synovial caudal dans le bourrelet de glissement caudal. b) Agrandissement de la coupe (a) objectivant les 3 réseaux intra-méniscaux (flèches rouges) (CT : couche de traction, CP : couche de pression, LF : lame de fasciculation, BGcr : bourrelet de glissement crânial, BGca : bourrelet de glissement caudal)

#### B. Vascularisation intra-méniscale chez l'enfant

L'étude immunohistochimique a pu être réalisée sur un ménisque médial d'un enfant de 11 ans et sur les 2 ménisques d'un enfant de 7 ans. Comme chez l'adulte, la répartition en 3 réseaux intra-méniscaux était retrouvée et l'étendue du réseau centroméniscal de la périphérie jusqu'au bord libre du ménisque était similaire à l'étendue des réseaux sous-synoviaux, que ce soit pour le ménisque médial ou latéral *(Fig. 38).* La vascularisation intra-méniscale était plus étendue et plus dense sur les ménisques pédiatriques que sur les ménisques adultes.



a)

b) Fig. 38 Coupe immunohistochimique d'un segment antérieur d'un ménisque médial pédiatrique. Marquage CD31. a) Comme chez l'adulte, il existe 3 réseaux vasculaires intra-méniscaux : le réseau centro-méniscal dans la lame de fasciculation, le réseau sous-synovial crânial dans le bourrelet de glissement crânial et le réseau sous-synovial caudal dans le bourrelet de glissement caudal. b) Agrandissement de la coupe (a) objectivant les 3 réseaux intra-méniscaux (flèches rouges) (CT : couche de traction, CP : couche de pression, LF : lame de fasciculation, BGcr : bourrelet de glissement crânial, BGca : bourrelet de glissement caudal)

### C. Comparaison de la vascularisation méniscale adulte et pédiatrique

L'étendue de la vascularisation du bord périphérique vers le bord libre du ménisque a été étudiée. Sur chaque segment étudié, l'étendue du réseau centro-méniscal était similaire à l'étendue des réseaux sous-synoviaux, que ce soit chez l'adulte ou chez l'enfant *(Fig. 39)*.

Chez l'adulte, le réseau centro-méniscal du ménisque latéral était observé sur ses 25% périphériques (min : 15% ; max : 39%) (*Fig. 39a*). Le réseau centro-méniscal du ménisque médial était observé sur ses 35% périphériques (min : 23% ; max : 65%) (*Fig. 39b*). La vascularisation des ménisques pédiatriques était plus dense et plus étendue vers le bord libre que les ménisques adultes. Le réseau centro-méniscal du ménisque latéral était observé sur ses 43% périphériques (min : 34% ; max : 49%) (*Fig. 39a*). Le réseau centro-méniscal des ménisques médiaux était observé sur ses 48% périphériques (min : 33% ; max : 72%) (*Fig. 39b*).



**Fig. 39** Graphique représentant l'étendue (exprimée en pourcentage) de la vascularisation intraméniscale des ménisques latéraux (a) et médiaux (b) adultes et pédiatriques. La barre horizontale correspond à la moyenne pour chaque réseau intra-méniscal. En moyenne, la vascularisation intraméniscale était plus étendue vers le bord libre sur les ménisques pédiatriques que sur les ménisques adultes.

Chez l'adulte comme chez l'enfant, les cornes méniscales étaient mieux vascularisées que le corps des ménisques *(Fig. 40)*. Pour chaque segment, la vascularisation intra-méniscale était plus étendue chez l'enfant que chez l'adulte, sauf pour le segment postérieur du ménisque médial pour lequel il n'a pas été montré une vascularisation intra-méniscale plus étendue chez l'enfant.



**Fig. 40** Graphique représentant l'étendue (exprimée en pourcentage) de la vascularisation intraméniscale pour chaque segment antérieur, moyen et postérieur des ménisques latéraux (a) et médiaux (b) adultes et pédiatriques. La barre horizontale correspond à la moyenne pour chaque réseau intraméniscal. En moyenne, la vascularisation intra-méniscale était plus étendue au niveau des cornes qu'au niveau des corps des ménisques.

# IV - Étude microtomodensitométrique de la vascularisation méniscale et reconstruction 3D

L'étude microtomodensitométrique de ménisques, préalablement injectés au sulfate de baryum puis imprégnés d'acide phosphotungstique, avait pour but la modélisation 3D de la vascularisation intra-méniscale. Malheureusement, peu de résultats concernant la vascularisation intra-méniscale ont été obtenus.

Les arcades péri-méniscales n'ayant pas été conservées dans leur totalité, le réseau périphérique n'était que partiellement mis en évidence *(Fig. 41 et 42).* 



**Fig. 41** Reconstruction microtomodensitométrique 3D : vue antérieure d'un ménisque médial gauche préparé selon les modalités décrites dans les Matériels et Méthodes. Visualisation du réseau périphérique le long du mur méniscal. Seule la partie antérieure de l'artère capsulo-méniscale médiale constituant l'arcade péri-méniscale médiale a été conservée. Ses branches terminales vascularisent le frein méniscal antérieur.



**Fig. 42** Reconstruction microtomodensitométrique 3D : vues crâniale (a) et antérieure (b) d'un segment moyen et postérieur d'un ménisque latéral droit préparé selon les modalités décrites dans les Matériels et Méthodes. Le tendon du muscle poplité a été conservé. L'arcade péri-méniscale est visible ici, constituée de l'artère articulaire inféro-latérale. Quelques branches radiaires alimentant le réseau périphérique étaient visibles

De rares artères centro-méniscales étaient observées. En coupe radiaire, l'artère centro-méniscale la plus souvent retrouvée était située dans la partie centrale du ménisque, probablement dans la lame de fasciculation. Plus rarement, d'autres artères centro-méniscales étaient retrouvées au-dessus ou en dessous de la partie centrale du ménisque. Elles provenaient du réseau périphérique du ménisque, leurs trajets étaient sinueux (*Fig. 43 et 44*).



*Fig. 43 Coupes radiaires tomodensitométriques d'un segment antérieur (a) et d'un segment moyen (b) d'un ménisque médial gauche préparé selon les modalités décrites dans les Matériels et Méthodes.* 



**Fig. 44** Reconstruction microtomodensitométrique 3D : a) vue postérieure d'une coupe radiaire d'un segment antérieur d'un ménisque médial gauche préparé selon les modalités décrites dans les Matériels et Méthodes. b) Agrandissement de a)

L'étude microtomodensitométrique des réseaux sous synoviaux était également très pauvre. Lorsqu'ils étaient observés, ils étaient alimentés par des branches provenant du réseau périphérique (*Fig. 45 et 46*).



**Fig. 45** Coupe radiaire microtomodensitométrique d'un segment antérieur d'un ménisque médial issu d'un genou gauche. Le ménisque a été préparé selon les modalités décrites dans les Matériels et Méthodes.



**Fig. 46** Reconstruction microtomodensitométrique 3D : vue postérieure d'une coupe radiaire d'un segment antérieur d'un ménisque médial gauche préparé selon les modalités décrites dans les Matériels et Méthodes.

# I - Artères articulaires et vascularisation méniscale

La recherche d'un réseau vasculaire intra-méniscal a fait l'objet de nombreux travaux pendant le XXe siècle et son existence n'a pas toujours fait l'unanimité parmi les Anatomistes. En 1926, De Ribet considère que les ménisques sont très faiblement vascularisés du fait de leur nature fibro-cartilagineuse [61]. En 1935, les ménisques sont des structures avasculaires selon Petersen [62]. C'est à partir de la deuxième moitié du XXe siècle que la plupart des auteurs s'accorde pour dire que les bords périphériques des ménisques sont vascularisés alors que les bords libres sont avasculaires [63–65]. Ce sont les travaux anatomiques d'Arnoczky et Warren [1] en 1982 qui se sont attachés à décrire précisément la vascularisation méniscale à partir de 20 genoux humains injectés à l'encre de Chine puis diaphanisés. Ils segmentent les ménisques en 3 zones : la zone périphérique des ménisques appelée « zone rouge-rouge » est vascularisée, la zone intermédiaire appelée « zone rouge-blanche ».

La vascularisation des ménisques provient des branches articulaires de l'artère poplitée qui forment les arcades péri-méniscales, parfois appelées « plexus capillaire périméniscal ». Peu d'études se sont attardées sur ces artères articulaires [1,66,67] et leurs descriptions dans les grands ouvrages d'Anatomie sont brèves. Ce sont les travaux de Sick et al. datant de 1976 qui ont porté sur la description les artères articulaires, notamment les artères articulaires inférieures [44].

La dissection de 20 genoux nous a permis de décrire précisément l'ensemble des artères articulaires. Ces artères étaient presque toujours présentes et leurs trajets étaient constants. Contrairement à Sick et al., le trajet des artères articulaires inférieures était différent entre le versant médial et le versant latéral : alors que l'artère articulaire inférolatérale longeait le bord périphérique du ménisque latéral, l'artère articulaire inféro-médiale se dirigeait vers le bas en passant en dessous de l'insertion tibiale du ligament collatéral médial, et ne rejoignait le ménisque médial qu'à hauteur de sa corne antérieure.

Les artères articulaires moyennes ont fait l'objet de quelques travaux anatomiques plus récents [68–71]. Nos observations concernant l'origine de l'artère articulaire moyenne dite « principale » étaient superposables aux travaux de Blacojevic et al. [68] (60% et 53% de l'artère poplitée, 25% et 33% de l'artère supéro-latérale, respectivement pour notre série et celle de Blacojevic et al.). Nous avons retrouvé dans 15% des cas une artère articulaire moyenne naissant de l'artère articulaire supéro-médiale, ce qui n'a pas été décrit dans la littérature. Blacojevic et al. ont, en revanche, décrit dans 13% des cas un tronc commun entre les artères articulaires supérieures et l'artère articulaire moyenne.

Dans notre série, l'artère articulaire moyenne traversait la capsule articulaire postérieure en passant soit dans le tendon récurrent du semi-membraneux dans 60% des cas, soit au dessus du tendon récurrent dans 40% des cas. Pour Scapinelli, l'artère articulaire moyenne passait toujours à travers le tendon récurrent [69] alors que pour Blacojevic et al., elle traversait le tendon récurrent dans seulement 37% des cas [68]. L'ensemble des travaux s'accorde pour dire que l'artère articulaire moyenne traversait la capsule postérieure plus à proximité du condyle fémoral latéral que du condyle fémoral médial et confirme l'importance de passer en dedans des vaisseaux poplités lors d'un abord postérieur du genou [68–71].

Alors que les descriptions anciennes avançaient qu'une fois intra-capsulaire, l'artère articulaire moyenne se divisait en une branche antérieure et une branche postérieure [44,72], elle se divisait dans notre série en de nombreuses branches vascularisant les ligaments croisés, le ligament adipeux du genou et les cornes antérieures et postérieures des ménisques participant ainsi à la constitution des arcades péri-méniscales. Les travaux récents sur la description intra-capsulaire de l'artère articulaire moyenne sont en accords avec nos constatations [69,71] (Fig. 47).

Auteur	n	Origine			Pa Orientation vers	Passage intra-capsulaire Rapport avec le t. récurrent			Territoire
		a. poplitée	a. supéro-lat	autre		Au dessus	Au travers	En dessous	
Scapinelli Clin Anat. (1997)	20	70%	30%	/	condyle fém. lat	/	100%	/	cornes méniscales, LCP LCA, membrane synoviale, ligament adipeux
Blagojevic et al. Int Orthop. (2015)	30	53,4%	33,3%	13,3% : tronc commun avec a. supéro-lat et a. supéro-med	condyle fem. lat	63,3%	33,7%	/	cornes méniscales, LCP LCA, membrane synoviale, ligament adipeux
<b>Decante</b> (2018)	20	60%	25%	15% : a. supéro-med	condyle fem. lat	40%	60%	/	cornes méniscales, LCP LCA, membrane synoviale, ligament adipeux

Artère articulaire moyenne principale

Fig. 47 Revue de la littérature : origine, trajet et territoire de l'artère articulaire moyenne

Une artère naissant sous l'artère articulaire moyenne principale a été retrouvée sur tous les genoux disséqués. Cette artère était initialement appelée « artère articulaire moyenne » car son origine et son calibre étaient comparables à l'artère articulaire moyenne principale. Mais son trajet étant exclusivement extra-capsulaire, nous avons décidé de la nommer « artère capsulo-méniscale médiale ».

Elle était originaire dans 80% des cas de l'artère poplitée, dans 15% des cas de l'artère articulaire inféro-médiale et dans 5% des cas de l'artère articulaire moyenne

principale. Elle rejoignait rapidement la capsule articulaire en restant extra-capsulaire et longeait le bord périphérique du ménisque médial. Sur tous les genoux analysés, l'artère capsulo-méniscale médiale était un des constituants principaux de l'arcade péri-méniscale médiale. Aucune étude ne fait état de cette artère capsulo-méniscale médiale pourtant retrouvée sur tous les genoux de notre série, mais certains travaux ont décrit des branches collatérales qui pourraient correspondre à cette artère. Ainsi, Sick et al. [44] ont décrit dans leur série l'existence d'une branche récurrente de l'artère inféro-médiale longeant la capsule articulaire à hauteur du bord périphérique du ménisque médial. Plus récemment, Blacojevic et al. ont observé une ou plusieurs branches capsulaires naissant à hauteur de l'artère articulaire moyenne et restant extra-capsulaires [68].

La plupart des ouvrages d'Anatomie ne décrivent qu'une artère articulaire moyenne [72,73]. Pourtant dans notre série, une artère articulaire moyenne inconstante dite « accessoire » a été retrouvée dans 55% des cas. Elle naissait dans 64% des cas de l'artère poplitée et 36% des cas de l'artère capsulo-méniscale médiale. Elle traversait la capsule articulaire en passant sous le tendon récurrent du semi-membraneux pour aller vasculariser les cornes postérieures des ménisques. Certains auteurs ont également observé dans 30% des cas une artère articulaire moyenne accessoire naissant de l'artère poplitée [68,69] (Fig. 48).

Auteur		D (	Origine		Passage intra-capsulaire		
	n	Présence	a. poplitée	a. capsulo-méniscale médiale	Au travers le t. récurrent	Sous le t.récurrent	Territoire
Scapinelli Clin Anat. (1997)	20	30%	100%	/	/	100%	1/3 inf du LCP, cornes méniscales postérieures, épiphyse tibiale proximale
Blagojevic et al. Int Orthop. (2015)	30	30%	100%	/	100%	/	Cornes méniscales postérieures
<b>Decante</b> (2018)	20	55%	64%	36%	/	100%	Cornes méniscales postérieures

Artère articulaire moyenne accessoire

*Fig. 48 Revue de la littérature : constance, origine, rapports et territoire de l'artère articulaire moyenne accessoire* 

Pour certains auteurs, toutes les artères articulaires participent à la constitution des arcades péri-méniscales [1,74]. Pour d'autres, ce sont seulement les artères articulaires moyennes et inférieures [44,66,75]. Dans notre étude, toutes les artères articulaires participaient à la vascularisation des ménisques grâce à un riche réseau anastomotique. L'arcade péri-méniscale latérale provenait essentiellement de l'artère articulaire inféro-latérale et des artères articulaires moyennes principales et accessoires. L'artère supéro-latérale, essentiellement destinée à l'environnement musculaire et osseux, s'anastomosait à l'arcade péri-méniscale latérale dans 70% des cas. L'arcade péri-méniscale médiale était quant à elle essentiellement constituée par l'artère capsulo-méniscale médiale et les artères

articulaires moyennes, mais les artères articulaires supéro-médiale et inféro-médiale y participaient également via de nombreuses anastomoses.

La vascularisation terminale des ménisques a été étudiée par 2 méthodes différentes : la dissection de genoux préalablement injectés à la gélatine colorée et l'étude histologique de ménisques par marquage immunohistochimique de l'endothélium. L'étude anatomique a retrouvé plusieurs réseaux vasculaires issus des arcades péri-méniscales : le réseau vasculaire périphérique constitué de branches radiaires, ascendantes et descendantes, les réseaux sous-synoviaux issus des arcades péri-méniscales mais aussi de la membrane synoviale et enfin le réseau centro-méniscal. Les 2 études montraient que la vascularisation des ménisques est une vascularisation centripète issue des arcades péri-méniscales. La densité des vaisseaux était plus importante à la périphérie du ménisque. Puis, plus on s'éloignait de la périphérie, plus la vascularisation se raréfiait pour être complètement absente dès la partie moyenne du ménisque. L'étude anatomique sur 6 genoux n'a retrouvé des vaisseaux que dans le 1/3 périphérique des ménisques. Il n'a pas été montré par l'étude anatomique que les cornes méniscales étaient plus vascularisées que les corps méniscaux. Il a cependant été retrouvé 2 zones avasculaires :

- Sur le ménisque latéral : le segment de ménisque en rapport avec le hiatus poplité. Cette zone avasculaire est connue et déjà décrite dans la littérature [1,6,66,74].
- Sur le ménisque médial : la jonction ménisco-capsulaire postérieure était peu vascularisée, notamment la face crâniale. Pourtant retrouvée sur nos 6 genoux, aucune autre étude ne fait état de cette zone hormis Müller qui a observé que la corne postérieure du ménisque médial est moins bien vascularisée [76]. Ainsi, les « ramp-lesion » de la corne postérieure du ménisque médial récemment décrites [31–34] pourraient être en partie favorisées par cet environnement vasculaire défavorable.

L'étude histologique portant sur 12 coupes de ménisques issues d'un genou adulte a montré que le ménisque latéral était vascularisé sur ses 25% périphériques (min : 15%; max : 39%) et que le ménisque médial était vascularisé sur ses 35% périphériques (min : 23%; max : 65%). Bien que ces résultats n'aient été obtenus qu'à partir d'un seul genou, ils sont concordants avec la littérature et notamment avec les travaux d'Arnoczky qui avaient montré que le ménisque latéral était vascularisé sur ses 10 à 30% périphériques et que le ménisque médial était vascularisé sur ses 10 à 25% périphériques [1]. Parmi les travaux anatomiques, radiologiques, histologiques ou immunohistochimiques sur ménisque adulte, aucune étude n'a réussi à montrer une vascularisation intra-méniscale s'étendant au delà du 1/3 périphérique [1,6,66,74,77] (*Fig. 49*).
Vascularisation intra-méniscale adulte

	n	Méthodologie	Vascularisation intra-méniscale	
Auteur			ménisque latéral	ménisque médial
Arnoczky et al. Am J Sports Med. (1982)	20	Diaphanisation et histologie	10 à 30% périphérique	10 à 25% périphérique
<b>Danzig et al.</b> Clin Orthop Relat Res. (1983)	25	Diaphanisation, radiologie, histologie	1/3 périphérique	1/3 périphérique
<b>Clark et al.</b> J Bone Joint Surg Am. (1983)	274	Anatomie, histologie	1/3 périphérique	1/3 périphérique
<b>Day et al.</b> Arthroscopy (1985)	23	Diaphanisation, radiologie, histologie	1/3 périphérique	1/3 périphérique
<b>Petersen et al.</b> Acta Orthop Scand. (1995)	15	Immunohistochimie	1/4 périphérique	1/4 périphérique
Hauger et al. Radiology (2000)	12	IRM	10-15% périphérique	10-15% périphérique
<b>Decante</b> (2018)	7	Anatomie, immunohistochimie	<ul><li>1/3 périphérique (anatomie)</li><li>25% périphérique (immunohistochimie)</li></ul>	<ul><li>1/3 périphérique (anatomie)</li><li>35% périphérique (immunohistochimie)</li></ul>

*Fig. 49 Revue de la littérature : vascularisation intra-méniscale. Quelque soit la méthodologie, aucune étude n'a montré une vascularisation intra-méniscale s'étendant au delà du 1/3 périphérique* 

L'étude histologique montrait que les cornes méniscales étaient plus vascularisées que les corps méniscaux, ce qui est en accord avec la littérature [1,66,67,74]. Les cornes méniscales ne paraissaient pas plus vascularisées dans notre étude anatomique, très probablement à cause d'un défaut d'injection intra-méniscale de la gélatine colorée.

# II - Discussion de la méthodologie

De nombreuses techniques ont été utilisées pour réaliser ces travaux. Les injections de latex-néoprène et de gélatine colorée à l'encre de Chine ont permis d'obtenir des résultats très satisfaisants pour l'étude des artères articulaires et des arcades péri-méniscales. Peu de genoux ont été exclus en raison d'un défaut d'injection des artères articulaires (2/23). De plus, l'injection des pièces anatomiques a rendu les dissections plus aisées et a permis d'obtenir une iconographie de très bonne qualité. En revanche, l'injection de latex néoprène n'était pas possible dans les petites artérioles (en dessous de 0,2mm de diamètre), le latex-néoprène étant trop visqueux pour permettre une bonne perfusion des petits vaisseaux.

Seules les pièces anatomiques injectées à la gélatine colorée ont été exploitées pour l'étude de la vascularisation méniscale terminale. Il y a cependant eu beaucoup de genoux exclus pour défaut d'injection des vaisseaux méniscaux terminaux (10/16). Dans la littérature, aucun auteur de fait état de difficulté d'injection de ces vaisseaux qui pourtant constituait un des principaux problèmes techniques de notre étude. Ces défauts d'injection peuvent être liés :

À la préparation injectée encore trop visqueuse (30g de gélatine pour 1 litre d'eau).
Mais la diminution de la gélatine rendait les dissections impossibles, l'encre de Chine se répandant sur la pièce en cas de brèche artérielle.

- Aux sujets anatomiques utilisés. L'âge moyen des sujets inclus pour l'étude de la vascularisation méniscale terminale était de 79 ans. Cette moyenne était plus élevée que celles des autres séries rapportées dans la littérature, même si peu d'auteurs le précisent dans leurs travaux [6,68,77]. De plus dans notre série, la présence de lésions athéromateuses chez les sujets anatomiques constituait un facteur majeur d'échec à l'injection, facteur lié indéniablement à l'âge de plus en plus élevé des sujets anatomiques disponibles.

Il en résulte donc un biais évident : seuls les vaisseaux injectés étaient observés. Les zones décrites comme « avasculaires » pouvaient correspondre à des zones non injectées.

La vascularisation méniscale peut être étudiée grâce à l'imagerie conventionnelle, comme l'ont rapporté plusieurs auteurs [66,74,77]. En revanche dans la littérature, aucun travail ne rapporte l'utilisation de l'imagerie microtomodensitométrique pour l'étude de la vascularisation intra-méniscale, permettant d'observer des vaisseaux de plus petit calibre (jusqu'à 6µm de diamètre [78]).

L'utilisation de l'imagerie microtomodensitométrique est une technique très séduisante. En effet, la reconstruction 3D à partir de multiples coupes micrométriques permet d'analyser la vascularisation intra-méniscale sur la totalité du ménisque, là où les coupes anatomiques ou histologiques n'étudiaient la vascularisation intra-méniscale que dans un plan au hasard. L'étude tridimensionnelle des ménisques avait pour ambition de préciser l'origine, le trajet et la terminaison des vaisseaux intra-méniscaux ainsi que leurs anastomoses éventuelles. Elle permettait également d'apprécier la densité de la vascularisation intra-méniscale.

Malheureusement, bien qu'encourageants, les résultats étaient très limités et peu de vaisseaux intra-méniscaux ont été retrouvés. Là aussi, l'injection incomplète des genoux semblait être la cause de ces résultats décevants. Outre les facteurs précédemment cités comme l'âge des sujets ou la présence de lésions athéromateuses, une meilleure préparation des sujets, comme un rinçage à l'eau ou l'utilisation de fibrinolytiques, pourrait améliorer la qualité des injections. La viscosité du produit injecté ne semble pas être un facteur limitant puisque d'autre études ont publié des résultats très satisfaisants en injectant la même préparation sur de petits animaux [78,79]; ces animaux étaient en revanche encore vivants ou tout juste euthanasiés lors de l'injection.

L'étude immunohistochimique de la vascularisation intra-méniscale par marquage de la protéine CD31 spécifique de l'endothélium a permis d'obtenir d'excellents résultats et de s'affranchir des difficultés d'injection. L'utilisation d'un anticorps anti-CD31 est en effet une référence pour l'étude de la vascularisation des tissus, notamment en anatomopathologie [80]. Belot et al. l'ont utilisé dans leurs travaux, en plus du marquage de CD34 et du facteur VIII RAS [81]. D'autres techniques, comme l'utilisation d'anticorps antilaminine, anti-VEGF, anti-Ve-Cadherine, ont été retrouvées dans la littérature [6,82]. L'étude histologique seule sans marquage immunologique spécifique n'est pas satisfaisante, comme Petersen et al. l'avaient déjà évoqué [6].

## III - Vascularisation méniscale et croissance

La vascularisation intra-méniscale se modifie pendant la croissance, de l'organogénèse jusqu'à la 7<sup>e</sup> décennie [6]. Pendant la période fœtale, les ménisques sont vascularisés dans leur totalité [5,6,66]. Plus récemment, Belot et al. [81] ont décrit, grâce à une étude immunohistochimique sur ménisques fœtaux âgés de 24 à 41 semaines, une évolution de la vascularisation intra-méniscale pendant la vie fœtale. Au 2<sup>e</sup> trimestre, la vascularisation intra-méniscale ne se limite qu'au 1/3 périphérique. Au 3<sup>e</sup> trimestre, il existe une invasion vasculaire centripète des ménisques qui seront totalement vascularisés à la naissance. Pendant les premiers mois de vie, les ménisques sont vascularisés dans leur intégralité. C'est vers l'âge de 9 mois que la vascularisation du bord libre des ménisques va commencer à disparaître [5]. À 2 ans, le bord libre des ménisques est déjà avasculaire [6]. Puis pendant la première décennie, il existe une diminution progressive centrifuge de la vascularisation intra-méniscale si bien que vers l'âge de 10 ans, le 1/3 central des ménisques est avasculaire [5]. La diminution de la vascularisation intra-méniscale se poursuit pour ne concerner que le 1/3 périphérique à l'âge adulte. Pour Petersen et al. [6], la diminution de la vascularisation intra-méniscale se poursuit pendant toute la vie: à 50 ans, seul le ¼ périphérique des ménisques est vascularisé et à 70 ans, les ménisques ne sont vascularisés que dans leur partie la plus périphérique. Ainsi, les ménisques adultes sont des structures fibro-cartilagineuses essentiellement avasculaires.

Les résultats de notre étude immunohistochimique sur 3 ménisques pédiatriques de 7 et 11 ans étaient cohérents avec les études précédentes. En effet, le réseau centro-méniscal du ménisque latéral était observé sur ses 43% périphériques (min : 34% ; max 49%) et le réseau centro-méniscal des ménisques médiaux était observé sur ses 48% périphériques (min : 33% ; max : 72%). Il ne semblait pas avoir de différence entre la vascularisation intraméniscale d'un enfant de 7 ans et celle d'un enfant de 11 ans. Bien que ces résultats ne soient obtenus qu'à partir de 3 ménisques, ils semblent confirmer que les ménisques pédiatriques sont mieux vascularisés que les ménisques adultes. En revanche, notre étude immunohistochimique sur 2 ménisques d'un sujet âgé de 76 ans montrait que le réseau centro-méniscal du ménisque latéral s'étendait sur ses 25% périphériques (min 15% ; max : 39%) et que le réseau centro-méniscal du ménisque médial s'étendait sur ses 35% périphériques (min : 23% ; max 65%). De plus, notre étude anatomique à la gélatine colorée sur 12 ménisques issus de sujets âgés en moyenne de 79 ans (de 58 à 96 ans) retrouvait une vascularisation intra-méniscale du 1/3 périphérique. Ces différents résultats paraissent montrer une meilleure vascularisation intra-méniscale chez le sujet de plus de 70 ans par rapport aux résultats immunohistochimiques de Petersen et al. qui avaient décrit une vascularisation seulement à la partie la plus périphérique des ménisques chez le sujet âgé [6].

La régression de la vascularisation intra-méniscale semble être corrélée avec la mise en charge de l'articulation du genou. Arnoczky a rapporté que ce sont les modifications des contraintes en compression des ménisques lors de l'acquisition de la marche qui sont responsables de la disparition progressive de la vascularisation intra-méniscale [83]. La croissance des ménisques impose cependant l'apport d'oxygène et de nutriments. Cet apport se fait dans les zones avasculaires par diffusion du liquide synovial vers les ménisques, mais aussi au sein des ménisques, de la vascularisation intra-méniscale terminale vers les zones avasculaires [84,85]. Ce phénomène de diffusion d'oxygène et de nutriments vers un tissu avasculaire est également retrouvé dans un autre fibro-cartilage : le disque inter-vertébral qui lui, est totalement avasculaire [86].

# IV - Vascularisation méniscale : applications cliniques et perspectives

Il est aujourd'hui admis que les ménisques ont un rôle crucial dans la biomécanique du genou, notamment en permettant une meilleure répartition des contraintes entre le fémur et le tibia, mais aussi en diminuant le coefficient de friction lors de la flexion du genou [54,55]. D'ailleurs, lors d'une méniscectomie partielle, une diminution de 10% de la surface du ménisque augmente les forces de compression entre le fémur et le tibia de 65% ; une méniscectomie totale augmente les forces de compression entre le fémur et le tibia de 235% [87]. L'évolution accélérée vers l'arthrose suite à une méniscectomie est désormais bien connue [88,89].

« *Save the meniscus* » est maintenant un slogan qui doit résonner pour presque toutes les lésions méniscales, notamment chez le jeune [90]. L'épargne méniscale est capitale, les sociétés savantes recommandent la suture des ménisques car ils peuvent cicatriser. Chez l'adulte, la réussite d'une suture méniscale varie de 65 à 92% [91-93]. Elle dépend de l'âge du patient, du délai entre la lésion et la suture, du type de lésion et de son emplacement, notamment si la lésion se situe dans une zone vascularisée. En effet, l'environnement vasculaire de la lésion conditionne sa cicatrisation. Ainsi, la zone « rouge-rouge » d'Arnoczky et Warren [1] a un excellent potentiel de cicatrisation, la zone « rouge-blanche » a généralement un bon potentiel de cicatrisation, en revanche une suture en zone « blanche-blanche » a un mauvais pronostic de cicatrisation du fait que cette zone soit avasculaire [94-96].

La règle de l'épargne méniscale est d'autant plus vraie chez l'enfant, les résultats retrouvés dans la littérature sont très encourageants [97-101]. Krych et al. [97] ont observé 80% de bons résultats fonctionnels à plus de 5 ans d'une suture méniscale. Accadbled et al. [98] ont obtenu des résultats similaires à 2 ans de recul, bien qu'ils aient montré également qu'il n'existe pas de corrélation entre un résultat fonctionnel satisfaisant et un aspect cicatrisé à l'imagerie IRM ou arthro-scanner (75% de bons résultats fonctionnels alors que les ménisques suturés ne semblaient cicatrisés en imagerie que dans 34% des cas). Vanderhave et al. [99] ont rapporté 95% de bons résultats cliniques à 2 ans dans leur série de 49 sutures méniscales. Les patients ayant encore les physes ouvertes au niveau du genou étaient tous asymptomatiques à 2 ans laissant penser que la lésion méniscale suturée avait cicatrisée. 9 sutures méniscales ont été effectuées en zone « blanche-blanche » et étaient considérées comme cicatrisées à 2 ans [99]. Noyes [100] quant à lui s'est intéressé au potentiel de cicatrisation des ménisques pédiatriques en zone « blanche-blanche ». Sur 71 sutures en zone avasculaire, il a décrit 75% de bons résultats fonctionnels à plus de 4 ans de recul.

Afin d'optimiser la cicatrisation des ménisques notamment en zone avasculaire, plusieurs approches thérapeutiques ont été étudiées [102]. Outre l'avivement de la lésion recommandé avant toute suture méniscale [103], la perforation de la lésion jusqu'à la périphérie du ménisque [104], l'injection de moelle osseuse intra-articulaire [105] ou encore l'auto greffe de membrane synoviale [106] ont été décrites dans le but d'améliorer la cicatrisation. Toutes ces approches paraissent converger vers un seul objectif : améliorer l'apport sanguin et l'apport de facteurs de croissance au niveau de la lésion avasculaire.

De nouvelles thérapies innovantes ont été étudiées afin de stimuler l'angiogenèse. Parmi elles, l'utilisation de facteurs de croissance comme *vascular endothelial growth factor* (VEGF) semble être une piste intéressante [107], mais les premiers résultats *in-vivo* sont pour l'instant peu concluants [108,109]. L'utilisation d'autres facteurs de croissance comme *connective tissue growth factor* (CTGF) [110], *hepatocyte growth factor* (HGF) [111] ou encore *endothelin-1* (ET-1) [112] sont des axes de recherches encourageants. L'utilisation de la dissection anatomique classique, de l'histologie, de l'immunohistochimie et de la microtomodensitométrie a permis de préciser la vascularisation méniscale. Les arcades péri-méniscales, bien que succinctement décrites dans la littérature, sont de riches réseaux formés par les artères articulaires et par une artère non décrite auparavant : l'artère capsulo-méniscale médiale. Notre travail a montré que ces arcades sont constantes, mais constituées différemment entre le versant médial et le versant latéral. Le réseau anastomotique y est dense, en particulier le versant médial.

Notre travail le confirme : les ménisques adultes sont des fibro-cartilages vascularisés uniquement sur leur 1/3 périphérique. Durant la première décennie, la vascularisation des ménisques est plus étendue vers le bord libre, ce qui explique les excellents résultats des réparations méniscales infantiles.

La description de la vascularisation intra-méniscale est encore incomplète. Sa modélisation en 3 dimensions permettrait de la préciser. L'utilisation de la microtomodensitométrie nous semble être la méthode la plus appropriée. Nos premiers résultats sont très encourageants et permettront peut-être à terme de proposer une systématisation de la vascularisation méniscale terminale. La fusion des coupes immunohistochimiques et microtomodensitométriques serait également une approche méthodologique à approfondir, qui permettrait de préciser la vascularisation intra-méniscale en cumulant les avantages des 2 techniques.

## Bibliographie :

- [1] Arnoczky SP, Warren RF. Microvasculature of the human meniscus. Am J Sports Med. avr 1982;10(2):90-5.
- [2] Hamel A, Rogez J-M. Embryologie et croissance normale du genou. In: Le genou de l'enfant. Sauramps medical. 2013. p. 13-24.
- [3] Larsen WJ. Embryologie humaine. de boeck. 2011.
- [4] Mérida-Velasco JA, Sánchez-Montesinos I, Espín-Ferra J, Rodríguez-Vázquez JF, Mérida-Velasco JR, Jiménez-Collado J. Development of the human knee joint. Anat Rec. juin 1997;248(2):269-78.
- [5] Clark CR, Ogden JA. Development of the menisci of the human knee joint. Morphological changes and their potential role in childhood meniscal injury. J Bone Joint Surg Am. avr 1983;65(4):538-47.
- [6] Petersen W, Tillmann B. Age-related blood and lymph supply of the knee menisci. A cadaver study. Acta Orthop Scand. août 1995;66(4):308-12.
- [7] Ingman AM, Ghosh P, Taylor TK. Variation of collagenous and non-collagenous proteins of human knee joint menisci with age and degeneration. Gerontologia. 1974;20(4):212-23.
- [8] McNicol D, Roughley PJ. Extraction and characterization of proteoglycan from human meniscus. Biochem J. mars 1980;185(3):705-13.
- [9] Haines RW. The tetrapod knee joint. J Anat. avr 1942;76(Pt 3):270-301.
- [10] Tardieu C. Ontogeny and phylogeny of femoro-tibial characters in humans and hominid fossils: functional influence and genetic determinism. Am J Phys Anthropol. nov 1999;110(3):365-77.
- [11] Tardieu C, Dupont JY. [The origin of femoral trochlear dysplasia: comparative anatomy, evolution, and growth of the patellofemoral joint]. Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot. juin 2001;87(4):373-83.
- [12] Javois C, Tardieu C, Lebel B, Seil R, Hulet C, Société française d'arthroscopie. Comparative anatomy of the knee joint: effects on the lateral meniscus. Orthop Traumatol Surg Res OTSR. déc 2009;95(8 Suppl 1):S49-59.
- [13] Tardieu C. [Morphogenesis of the femoral diaphysis in humans: significance of function and evolution]. Folia Primatol Int J Primatol. 1994;63(1):53-8.
- [14] Kapandji A-I, Judet T. Anatomie fonctionnelle : Tome 2 Membre inférieur. 6e édition. Paris: Maloine; 2009. 314 p.

- [15] Barone R. Anatomie comparée des mammifères domestiques: Arthrologie et myologie. Vigot; 2000. 1006 p.
- [16] Proffen BL, McElfresh M, Fleming BC, Murray MM. A COMPARATIVE ANATOMICAL STUDY OF THE HUMAN KNEE AND SIX ANIMAL SPECIES. The Knee. août 2012;19(4):493-9.
- [17] Beaufils P, Verdonk R. The Meniscus. 2010<sup>e</sup> éd. Springer; 2010. 407 p.
- [18] McDermott ID, Sharifi F, Bull AMJ, Gupte CM, Thomas RW, Amis AA. An anatomical study of meniscal allograft sizing. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc Off J ESSKA. mars 2004;12(2):130-5.
- [19] Fukazawa I, Hatta T, Uchio Y, Otani H. Development of the meniscus of the knee joint in human fetuses. Congenit Anom. mars 2009;49(1):27-32.
- [20] Heller L, Langman J. THE MENISCO-FEMORAL LIGAMENTS OF THE HUMAN KNEE. J Bone Joint Surg Br. mai 1964;46:307-13.
- [21] Radoïévitch S. les ligaments des ménisques articulaires du genou. In: Annals of Anatomy and Pathology. 1931. p. 400-13.
- [22] Kusayama T, Harner CD, Carlin GJ, Xerogeanes JW, Smith BA. Anatomical and biomechanical characteristics of human meniscofemoral ligaments. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc Off J ESSKA. 1994;2(4):234-7.
- [23] Poynton AR, Javadpour SM, Finegan PJ, O'Brien M. The meniscofemoral ligaments of the knee. J Bone Joint Surg Br. mars 1997;79(2):327-30.
- [24] Kohn D, Moreno B. Meniscus insertion anatomy as a basis for meniscus replacement: a morphological cadaveric study. Arthrosc J Arthrosc Relat Surg Off Publ Arthrosc Assoc N Am Int Arthrosc Assoc. févr 1995;11(1):96-103.
- [25] Gupte CM, Bull AMJ, Thomas RD, Amis AA. The meniscofemoral ligaments: secondary restraints to the posterior drawer. Analysis of anteroposterior and rotary laxity in the intact and posterior-cruciate-deficient knee. J Bone Joint Surg Br. juill 2003;85(5):765-73.
- [26] Philippot R, Boyer B, Testa R, Farizon F, Moyen B. The role of the medial ligamentous structures on patellar tracking during knee flexion. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc Off J ESSKA. févr 2012;20(2):331-6.
- [27] Nelson EW, LaPrade RF. The anterior intermeniscal ligament of the knee. An anatomic study. Am J Sports Med. févr 2000;28(1):74-6.
- [28] Hughston JC. Knee Ligaments: Injury and Repair. In St. Louis: Mosby-Year Book; 1993. p. 48-61.

- [29] Kim YC, Yoo WK, Chung IH, Seo JS, Tanaka S. Tendinous insertion of semimembranosus muscle into the lateral meniscus. Surg Radiol Anat SRA. 1997;19(6):365-9.
- [30] Peltier A, Lording T, Maubisson L, Ballis R, Neyret P, Lustig S. The role of the meniscotibial ligament in posteromedial rotational knee stability. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc Off J ESSKA. oct 2015;23(10):2967-73.
- [31] Peltier A, Lording TD, Lustig S, Servien E, Maubisson L, Neyret P. Posteromedial meniscal tears may be missed during anterior cruciate ligament reconstruction. Arthrosc J Arthrosc Relat Surg Off Publ Arthrosc Assoc N Am Int Arthrosc Assoc. avr 2015;31(4):691-8.
- [32] Liu X, Feng H, Zhang H, Hong L, Wang XS, Zhang J. Arthroscopic prevalence of ramp lesion in 868 patients with anterior cruciate ligament injury. Am J Sports Med. avr 2011;39(4):832-7.
- [33] Sonnery-Cottet B, Conteduca J, Thaunat M, Gunepin FX, Seil R. Hidden lesions of the posterior horn of the medial meniscus: a systematic arthroscopic exploration of the concealed portion of the knee. Am J Sports Med. avr 2014;42(4):921-6.
- [34] Malatray M, Raux S, Peltier A, Pfirrmann C, Seil R, Chotel F. Ramp lesions in ACL deficient knees in children and adolescent population: a high prevalence confirmed in intercondylar and posteromedial exploration. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc Off J ESSKA. mars 2017;
- [35] Berlet GC, Fowler PJ. The anterior horn of the medical meniscus. An anatomic study of its insertion. Am J Sports Med. août 1998;26(4):540-3.
- [36] Wilson AS, Legg PG, McNeur JC. Studies on the innervation of the medial meniscus in the human knee joint. Anat Rec. déc 1969;165(4):485-91.
- [37] Gray JC. Neural and vascular anatomy of the menisci of the human knee. J Orthop Sports Phys Ther. janv 1999;29(1):23-30.
- [38] Assimakopoulos AP, Katonis PG, Agapitos MV, Exarchou EI. The innervation of the human meniscus. Clin Orthop. févr 1992;(275):232-6.
- [39] Zimny ML, Albright DJ, Dabezies E. Mechanoreceptors in the human medial meniscus. Acta Anat (Basel). 1988;133(1):35-40.
- [40] Herwig J, Egner E, Buddecke E. Chemical changes of human knee joint menisci in various stages of degeneration. Ann Rheum Dis. août 1984;43(4):635-40.
- [41] McDevitt CA, Webber RJ. The ultrastructure and biochemistry of meniscal cartilage. Clin Orthop. mars 1990;(252):8-18.
- [42] Cheung HS. Distribution of type I, II, III and V in the pepsin solubilized collagens in bovine menisci. Connect Tissue Res. 1987;16(4):343-56.

- [43] Gigante A, Specchia N, Greco F. Age-related distribution of elastic fibers in the rabbit knee. Clin Orthop. nov 1994;(308):33-42.
- [44] Sick H, Koritké JG. La vascularisation des ménisques de l'articulation du genou. Z Für Anat Entwicklungsgeschichte. 1969;129(4):359-79.
- [45] Petersen W, Tillmann B. [Structure and vascularization of the knee joint menisci]. Z Orthop Ihre Grenzgeb. févr 1999;137(1):31-7.
- [46] Beaupré A, Choukroun R, Guidouin R, Garneau R, Gérardin H, Cardou A. Knee menisci. Correlation between microstructure and biomechanics. Clin Orthop. juill 1986;(208):72-5.
- [47] Bullough PG, Munuera L, Murphy J, Weinstein AM. The strength of the menisci of the knee as it relates to their fine structure. J Bone Joint Surg Br. août 1970;52(3):564-7.
- [48] Fithian DC, Kelly MA, Mow VC. Material properties and structure-function relationships in the menisci. Clin Orthop. mars 1990;(252):19-31.
- [49] Tissakht M, Ahmed AM. Tensile stress-strain characteristics of the human meniscal material. J Biomech. avr 1995;28(4):411-22.
- [50] Gabrion A, Aimedieu P, Laya Z, Havet E, Mertl P, Grebe R, et al. Relationship between ultrastructure and biomechanical properties of the knee meniscus. Surg Radiol Anat SRA. déc 2005;27(6):507-10.
- [51] Skaggs DL, Warden WH, Mow VC. Radial tie fibers influence the tensile properties of the bovine medial meniscus. J Orthop Res Off Publ Orthop Res Soc. mars 1994;12(2):176-85.
- [52] Vedi V, Williams A, Tennant SJ, Spouse E, Hunt DM, Gedroyc WM. Meniscal movement. An in-vivo study using dynamic MRI. J Bone Joint Surg Br. janv 1999;81(1):37-41.
- [53] Seedhom BB, Hargreaves DJ. Transmission of the Load in the Knee Joint with Special Reference to the Role of the Menisci: Part II: Experimental Results, Discussion and Conclusions. Eng Med. oct 1979;8(4):220-8.
- [54] Ahmed AM. The load-bearing role of the knee menisci. In: Mow VC, Arnoczky SP, and Jackson DW, Knee meniscus: Basic and clinical foundations, New York : Raven Press, Ltd; 1992. p. 59-73.
- [55] Renström P, Johnson RJ. Anatomy and biomechanics of the menisci. Clin Sports Med. juill 1990;9(3):523-38.
- [56] Trillat A, Dejour H, Bousquet G, genou J de chirurgie du Chirurgie du genou. Villeurbanne: SIMEP; 1978. 163 p.

- [57] Papageorgiou CD, Gil JE, Kanamori A, Fenwick JA, Woo SL, Fu FH. The biomechanical interdependence between the anterior cruciate ligament replacement graft and the medial meniscus. Am J Sports Med. avr 2001;29(2):226-31.
- [58] Jiang W, Gao S-G, Li K-H, Luo L, Li Y-S, Luo W, et al. Impact of Partial and complete rupture of anterior cruciate ligament on medial meniscus: A cadavaric study. Indian J Orthop. sept 2012;46(5):514-9.
- [59] Strobel. Manual of Arthroscopic Surgery. Springer. New York; 1988.
- [60] Chahla J, Dean CS, Moatshe G, Mitchell JJ, Cram TR, Yacuzzi C, et al. Meniscal Ramp Lesions: Anatomy, Incidence, Diagnosis, and Treatment. Orthop J Sports Med. juill 2016;4(7):2325967116657815.
- [61] De Ribet RM. les artères ostéo-articulaires. Mémoire pour l'agrégation d'Anatomie. 1926. In: Titres et Travaux. Impr. Mod. Alger; 1939. p. 22-7.
- [62] Petersen H. Histologie und Mikroskopische Anatomie. Springer-Verlag; 1935. 963 p.
- [63] Barnett CH, Davies DV, Connaill MAM. Synovial joints. In London: Longmans; 1962. p. 95-6.
- [64] Testut L, Latarjet A. Traité d'Anatomie humaine. In Paris: Doin; 1948. p. 483.
- [65] Orlovskii YA. The vascular system of the menisci of the knee joint in man. Arkh Anat Gistol Embriol. 1962;48:77-83.
- [66] Day B, Mackenzie WG, Shim SS, Leung G. The vascular and nerve supply of the human meniscus. Arthrosc J Arthrosc Relat Surg. janv 1985;1(1):58-62.
- [67] Benedetto KP, Glötzer W, Künzel KH, Gaber O. The vascularization of the menisci. Morphological basis for the repair. Acta Anat (Basel). 1985;124(1-2):88-92.
- [68] Blagojević Z, Vukomanović B, Kadija M, Stevanović V, Manojlović R, Džinović D, et al. Microsurgical anatomy of the extra-articular segment of middle genicular artery. Int Orthop. nov 2015;39(11):2109-15.
- [69] Scapinelli R. Vascular anatomy of the human cruciate ligaments and surrounding structures. Clin Anat N Y N. 1997;10(3):151-62.
- [70] Shahid S, Saghir N, Cawley O, Saujani S. A Cadaveric Study of the Branching Pattern and Diameter of the Genicular Arteries: A Focus on the Middle Genicular Artery. J Knee Surg. oct 2015;28(5):417-24.
- [71] Salaria H, Atkinson R. Anatomic study of the middle genicular artery. J Orthop Surg Hong Kong. avr 2008;16(1):47-9.
- [72] Rouvière H. Anatomie humaine descriptive, topographique et fonctionnelle. 11e Ed. par A. Delmas. In Paris: Masson et Cie; 1974. p. 407.

- [73] Bonnel F, Chevrel J, Outrequin. Anatomie clinique, les membres. Springer-Verlag. France; 1991.
- [74] Danzig L, Resnick D, Gonsalves M, Akeson WH. Blood supply to the normal and abnormal menisci of the human knee. Clin Orthop. févr 1983;(172):271-6.
- [75] Gotta Sery F. Angioarchitectonic of the Knee Joint Menisci of Neonates and Infant: Chirurgical Finding. Rev Int Sc Méd. 2017;19(4).
- [76] Müller W. Form, Funktion, und ligamentäre Wiederherstellungschirurgie. In: Das Knie. Springer. Berlin; 1982.
- [77] Hauger O, Frank LR, Boutin RD, Lektrakul N, Chung CB, Haghighi P, et al. Characterization of the « red zone » of knee meniscus: MR imaging and histologic correlation. Radiology. oct 2000;217(1):193-200.
- [78] Blery P, Mathieu N, Vanden-Bossche A, Thery A, Pilet P, Guicheux J, et al. communication affichée : imagerie par microscanner de la vascularisation. 38e Journ CNEPO Lyon. 2014;
- [79] Michel G, Blery P, Pilet P, Guicheux J, Weiss P, Malard O, et al. Micro-CT Analysis of Radiation-Induced Osteopenia and Bone Hypovascularization in Rat. Calcif Tissue Int. juill 2015;97(1):62-8.
- [80] Leong AS-Y, Cooper K, Leong FJW-M. Manual of diagnostic antibodies for immunohistology (2 ed.). In: Greenwich Medical Media, Ltd. London; 2003. p. 103.
- [81] Belot D, Geffard B, Lebel B, Lautridou C, Abadie P, Hulet C, et al. Étude de la vascularisation méniscale pendant la vie intra-utérine: à propos 16 cas. /data/revues/00351040/009200S8/68\_2/ [Internet]. 27 mars 2008 [cité 12 mai 2018]; Disponible sur: http://www.em-consulte.com/en/article/131827
- [82] Di Giancamillo A, Deponti D, Modina S, Tessaro I, Domeneghini C, Peretti GM. Agerelated modulation of angiogenesis-regulating factors in the swine meniscus. J Cell Mol Med. nov 2017;21(11):3066-75.
- [83] Arnoczky SP. Gross and vascular anatomy of the meniscus and its role in meniscal healing, regeneration andremodeling. In: Knee Meniscus: Basic and Clinical Foundations. Raven Press. New York: Mow V, Arnoczky S, Jackson D; 1992. p. 1-14.
- [84] Meyers E, Zhu W, Mow V. Viscoelastic properties of articular cartilage and meniscus. In: Collagen: Chemistry, Biology and Biotechnology. Boca Raton, FL: CRC. Nimni M; 1988.
- [85] Mow V, Fithian D, Kelly M. Fundamentals of articular cartilage and meniscus biomechanics. In: Articular Cartilage and Knee Joint Function: Basic Science and Arthroscopy. Raven Press. New York: Ewing JW; 1989. p. 1-18.
- [86] Urban JPG, Smith S, Fairbank JCT. Nutrition of the intervertebral disc. Spine. déc 2004;29(23):2700-9.

- [87] Baratz ME, Fu FH, Mengato R. Meniscal tears: the effect of meniscectomy and of repair on intraarticular contact areas and stress in the human knee. A preliminary report. Am J Sports Med. août 1986;14(4):270-5.
- [88] Neyret P, Donell ST, Dejour H. Osteoarthritis of the knee following meniscectomy. Br J Rheumatol. mars 1994;33(3):267-8.
- [89] Chatain F, Robinson AH, Adeleine P, Chambat P, Neyret P. The natural history of the knee following arthroscopic medial meniscectomy. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc Off J ESSKA. 2001;9(1):15-8.
- [90] Lubowitz JH, Poehling GG. Save the meniscus. Arthrosc J Arthrosc Relat Surg Off Publ Arthrosc Assoc N Am Int Arthrosc Assoc. mars 2011;27(3):301-2.
- [91] Bryant D, Dill J, Litchfield R, Amendola A, Giffin R, Fowler P, et al. Effectiveness of bioabsorbable arrows compared with inside-out suturing for vertical, reparable meniscal lesions: a randomized clinical trial. Am J Sports Med. juin 2007;35(6):889-96.
- [92] Choi N-H, Kim T-H, Victoroff BN. Comparison of arthroscopic medial meniscal suture repair techniques: inside-out versus all-inside repair. Am J Sports Med. nov 2009;37(11):2144-50.
- [93] Pujol N, Panarella L, Selmi TAS, Neyret P, Fithian D, Beaufils P. Meniscal healing after meniscal repair: a CT arthrography assessment. Am J Sports Med. août 2008;36(8):1489-95.
- [94] Arnoczky SP, Warren RF. The microvasculature of the meniscus and its response to injury. An experimental study in the dog. Am J Sports Med. juin 1983;11(3):131-41.
- [95] Weiss CB, Lundberg M, Hamberg P, DeHaven KE, Gillquist J. Non-operative treatment of meniscal tears. J Bone Joint Surg Am. juill 1989;71(6):811-22.
- [96] McCarty EC, Marx RG, DeHaven KE. Meniscus repair: considerations in treatment and update of clinical results. Clin Orthop. sept 2002;(402):122-34.
- [97] Krych AJ, McIntosh AL, Voll AE, Stuart MJ, Dahm DL. Arthroscopic repair of isolated meniscal tears in patients 18 years and younger. Am J Sports Med. juill 2008;36(7):1283-9.
- [98] Accadbled F, Cassard X, Sales de Gauzy J, Cahuzac JP. Meniscal tears in children and adolescents: results of operative treatment. J Pediatr Orthop Part B. janv 2007;16(1):56-60.
- [99] Vanderhave KL, Moravek JE, Sekiya JK, Wojtys EM. Meniscus tears in the young athlete: results of arthroscopic repair. J Pediatr Orthop. août 2011;31(5):496-500.
- [100] Noyes FR, Barber-Westin SD. Arthroscopic repair of meniscal tears extending into the avascular zone in patients younger than twenty years of age. Am J Sports Med. août 2002;30(4):589-600.

- [101] Schmitt A, Batisse F, Bonnard C. Results with all-inside meniscal suture in pediatrics. Orthop Traumatol Surg Res OTSR. avr 2016;102(2):207-11.
- [102] Williams LB, Adesida AB. Angiogenic approaches to meniscal healing. Injury. mars 2018;49(3):467-72.
- [103] Uchio Y, Ochi M, Adachi N, Kawasaki K, Iwasa J. Results of rasping of meniscal tears with and without anterior cruciate ligament injury as evaluated by second-look arthroscopy. Arthrosc J Arthrosc Relat Surg Off Publ Arthrosc Assoc N Am Int Arthrosc Assoc. juin 2003;19(5):463-9.
- [104] Fox JM, Rintz KG, Ferkel RD. Trephination of incomplete meniscal tears. Arthrosc J Arthrosc Relat Surg Off Publ Arthrosc Assoc N Am Int Arthrosc Assoc. 1993;9(4):451-5.
- [105] Ahn J-H, Kwon O-J, Nam T-S. Arthroscopic repair of horizontal meniscal cleavage tears with marrow-stimulating technique. Arthrosc J Arthrosc Relat Surg Off Publ Arthrosc Assoc N Am Int Arthrosc Assoc. janv 2015;31(1):92-8.
- [106] Cisa J, Basora J, Madarnas P, Ghibely A, Navarro-Quilis A. Meniscal repair by synovial flap transfer. Healing of the avascular zone in rabbits. Acta Orthop Scand. févr 1995;66(1):38-40.
- [107] Esparza R, Gortazar AR, Forriol F. Cell study of the three areas of the meniscus: effect of growth factors in an experimental model in sheep. J Orthop Res Off Publ Orthop Res Soc. oct 2012;30(10):1647-51.
- [108] Kopf S, Birkenfeld F, Becker R, Petersen W, Stärke C, Wruck CJ, et al. Local treatment of meniscal lesions with vascular endothelial growth factor. J Bone Joint Surg Am. nov 2010;92(16):2682-91.
- [109] Forriol F, Longo UG, Duart J, Ripalda P, Vaquero J, Loppini M, et al. VEGF, BMP-7, Matrigel(TM), hyaluronic acid, in vitro cultured chondrocytes and trephination for healing of the avascular portion of the meniscus. An experimental study in sheep. Curr Stem Cell Res Ther. 2015;10(1):69-76.
- [110] He W, Liu Y-J, Wang Z-G, Guo Z-K, Wang M-X, Wang N. Enhancement of meniscal repair in the avascular zone using connective tissue growth factor in a rabbit model. Chin Med J (Engl). déc 2011;124(23):3968-75.
- [111] Hidaka C, Ibarra C, Hannafin JA, Torzilli PA, Quitoriano M, Jen S-S, et al. Formation of vascularized meniscal tissue by combining gene therapy with tissue engineering. Tissue Eng. févr 2002;8(1):93-105.
- [112] Yuan X, Eng GM, Arkonac DE, Chao P-HG, Vunjak-Novakovic G. Endothelial cells enhance the migration of bovine meniscus cells. Arthritis Rheumatol Hoboken NJ. janv 2015;67(1):182-92.

Liste des figures :

Fig.	1 Coupe d'un genou d'un embryon de 6 semaines (Mérida-Velasco et al. [5])	12
Fig.	2 Coupe sagittale d'un genou d'un embryon de 7,5 semaines (Mérida-Velasco et al. [5])	12
Fig.	<b>3</b> Coupe coronale d'un genou d'un embryon à 9 semaines (Mérida-Velasco et al. [5])	13
Fig.	4 : Fémur d'un homme, d'un chimpanzé et d'un cercopithèque (Tardieu et al. [14])	15
Fig.	5 Vues crâniales de l'épiphyse proximale du tibia droit d'un humain, chimpanzé, chien, mouton	17
Fig.	<b>6</b> Morphologie des ménisques : a) vue crâniale d'un ménisque latéral droit. b) Coupe radiaire d'un ménisque latéral droit	18
Fig.	7 Morphologie des ménisques : les longueurs antéro-postérieures et les largeurs moyennes	19
Fig.	8 Moyens de stabilité des ménisques : a) vue crâniale d'un ménisque médial droit : ligament coronaire, ligament capsulo-méniscal. b) vue crâniale d'un ménisque latéral droit : ligament coronaire, hiatus poplité	21
Fig.	<b>9</b> a) Coupe radiaire d'un segment moyen d'un ménisque médial colorée à l'hématoxyline-éosine. b) agrandissements de la coupe a)	26
Fig.	<ul><li>10 Schéma d'une coupe transversale du ménisque : organisation intrinsèque (Sick et al. [45])</li></ul>	27
Fig.	<ul><li>11 a) Schéma illustrant les réseaux de collagène au sein du ménisque. b) coupes méniscales et analyses microscopiques des faisceaux de collagène (Bullough et al. [48])</li></ul>	28
Fig.	12 schéma illustrant le recul des ménisques lors de la flexion du genou. a) genou en charge, b) genou non en charge (Vedi et al. [53])	29
Fig.	13 Vue crâniale de la coupe transversale d'une pièce injectée au sulfate de baryum. Les condyles fémoraux ont été retirés	37
Fig.	14 Vue postérieure d'un genou droit injecté au latex-néoprène : vue d'ensemble	39
Fig.	15 Vues latérale (a) et médiale (b) d'un genou droit injecté au latex-néoprène : les artères articulaires	40
Fig.	16 Vue postéro-latérale d'un genou gauche injecté au latex-néoprène : l'artère articulaire supéro-latérale. Description d'une variation du trajet de l'artère tibiale antérieure	41
Fig.	<b>17</b> Vue postéro-médiale d'un genou gauche injecté au latex-néoprene : les artères articulaires moyennes et l'artère capsulo-méniscale médiale	43

Fig.	<ul><li>18 Vues postérieure (a) et antérieure (b) d'un genou gauche injecté au latex-néoprène.</li><li>a) Description du trajet et des branches de l'artère articulaire moyenne</li></ul>	44
Fig.	<b>19</b> Vue supéro-postéro-médiale d'un genou gauche injecté au latex-néoprène. Description de l'artère articulaire moyenne accessoire et de l'artère capsulo-méniscale médiale	46
Fig.	<b>20</b> a) Schéma en vue postérieure d'un genou droit décrivant les artères articulaires moyennes et l'artère capsulo-méniscale médiale. b) Tableau récapitulatif résumant la description des artères articulaires moyennes et de l'artère capsulo-méniscale médiale.	47
Fig.	<b>21</b> Vue antéro-médiale d'un genou droit injecté au latex-néoprène : les anastomoses antérieures et médiales	48
Fig.	<b>22</b> Vue antérieure d'un genou droit injecté à la gélatine colorée : anastomoses entre les artères articulaires inféro-latérale, inféro-médiale moyenne principale et l'artère capsulo-méniscale médiale	49
Fig.	<b>23</b> Vue latérale d'un genou droit injecté à la gélatine colorée : anastomose latérale entre l'artère articulaire supéro-latérale et l'artère articulaire inféro-latérale	50
Fig.	<b>24</b> Vues latérale (a) et médiale (b) des arcades péri-méniscales issues d'un genou gauche injecté au latex-néoprène	51
Fig.	25 Vue crâniale des arcades péri-méniscales issues d'un genou gauche injecté au latex- néoprène	52
Fig.	<b>26</b> Schéma en vue antérieure du cercle anastomotique péri-articulaire d'un genou droit. Description des arcades péri-méniscales médiale et latérale	53
Fig.	<b>27</b> a) Schéma en vue crâniale des arcades péri-méniscales médiale et latérale. b) Tableau récapitulatif résumant les constituants des arcades péri-méniscales	53
Fig.	<b>28</b> Vue antérieure d'un ménisque médial issu d'un genou gauche injecté à la gélatine colorée : le réseau périphérique	54
Fig.	<b>29</b> Vue postéro-latérale d'un ménisque latéral issu d'un genou gauche injecté à la gélatine colorée : le réseau périphérique et ses origines	55
Fig.	<b>30</b> Vue médiale d'un ménisque et d'un tibia issus d'un genou gauche injecté à la gélatine colorée : le réseau périphérique et ses origines	55
Fig.	<b>31</b> Vue crâniale d'un genou gauche injectée à la gélatine colorée : le réseau sous synovial des faces crâniales des ménisques	56
Fig.	<b>32</b> a) Vue latérale d'un ménisque latéral issu d'un genou gauche injecté à la gélatine colorée. b)Vue antérieure d'un ménisque médial issu d'un genou gauche injecté à la gélatine colorée : origine des réseaux sous-synoviaux	57
Fig.	<b>33</b> a) Vue ventro-crâniale d'un ménisque latéral d'un genou gauche injecté à la gélatine colorée. b) Vue caudale des ménisques issus d'un genou gauche injecté à gélatine colorée : les réseaux sous-synoviaux	57

Fig.	<b>34</b> Coupe radiaire d'un ménisque médial issu d'un genou droit injecté à la gélatine colorée : le réseau centro-méniscal	58
Fig.	<b>35</b> Segments de ménisques issus d'un genou gauche injecté à la gélatine colorée a) Vue supérieure d'un segment de ménisque médial. b) Coupe circonférentielle d'un ménisque latéral à la jonction 1/3 périphérique - 2/3 centraux : les réseaux sous-synoviaux et centro-méniscaux	59
Fig.	<b>36</b> Coupes radiaires d'une corne antérieure (a), d'un corps (b) et d'une corne postérieure (c) d'un ménisque médial issu d'un genou gauche injecté à la gélatine colorée : le réseau centro-méniscal	59
Fig.	<b>37</b> a) Coupe immunohistochimique d'un segment antérieur d'un ménisque latéral adulte. Marquage CD31. b) Agrandissement de la coupe (a) : les réseaux vasculaires intra-méniscaux	61
Fig.	<b>38</b> a) Coupe immunohistochimique d'un segment antérieur d'un ménisque médial pédiatrique. Marquage CD31. b) Agrandissement de la coupe (a)	62
Fig.	<b>39</b> Graphique représentant l'étendue de la vascularisation intra-méniscale des ménisques latéraux (a) et médiaux (b) adultes et pédiatriques	63
Fig.	<b>40</b> Graphique représentant l'étendue de la vascularisation intra-méniscale pour chaque segment antérieur, moyen et postérieur des ménisques latéraux (a) et médiaux (b) adultes et pédiatriques	64
Fig.	<b>41</b> Reconstruction microtomodensitométrique 3D : vue antérieure d'un ménisque médial gauche : le réseau périphérique	65
Fig.	<b>42</b> Reconstruction microtomodensitométrique 3D : vues crâniale (a) et antérieure (b) d'un segment moyen et postérieur d'un ménisque latéral droit : l'arcade péri-méniscale latérale	66
Fig.	<b>43</b> Coupes radiaires tomodensitométriques d'un segment antérieur (a) et d'un segment moyen (b) d'un ménisque médial gauche : artères centro-méniscales	66
Fig.	<b>44</b> (a)Reconstruction microtomodensitométrique 3D : vue postérieure d'une coupe radiaire d'un segment antérieur d'un ménisque médial gauche: les artères centroméniscales. (b) Agrandissement de (a)	67
Fig.	<b>45</b> Coupe radiaire microtomodensitométrique d'un segment antérieur d'un ménisque médial issu d'un genou gauche : le réseau sous-synovial	68
Fig.	<b>46</b> Reconstruction microtomodensitométrique 3D : vue postérieure d'une coupe radiaire d'un segment antérieur d'un ménisque médial gauche : le réseau sous synovial	68
Fig.	47 Revue de la littérature : origine, trajet et territoire de l'artère articulaire moyenne	70
Fig.	<b>48</b> Revue de la littérature : constance, origine, rapports et territoire de l'artère articulaire moyenne accessoire	71
Fig.	49 Revue de la littérature : vascularisation intra-méniscale	73

Vu, le Président du Jury, (tampon et signature)

GROUPEMENT HOSPITALIER EST Hôpital Femme Mère Enfant Professeur Franck CHOTEL Chef de service Chirurgie Orthopédique Infantile 59, Bd Pinel - 69677 Bron cedex

Professeur Franck CHOTEL

Vu, le Directeur de Thèse, (tampon et signature)

Professeur Antoine HAMEL

Professeur A. HAMEL Chirurgie Infantile Orthopec aumatotogie CHU de NANTES RPPS 10002581428

Vu, le Doyen de la Faculté,

Professeur Pascale JOLLIET

## **PRENOM** : Cyrille

**Titre de Thèse :** VASCULARISATION MÉNISCALE : ÉTUDE ANATOMIQUE, HISTOLOGIQUE ET MICROTOMODENSITOMÉTRIQUE

### RESUME

#### Introduction

La qualité de la cicatrisation d'une lésion méniscale est conditionnée par sa vascularisation. Alors que le concept de l'économie méniscale est acquis, la vascularisation méniscale est encore mal connue. L'objectif de ce travail était de décrire la vascularisation des ménisques.

#### Matériels et Méthodes

Il s'agit d'une étude descriptive sur pièces anatomiques humaines. Au total, 34 genoux ont été sélectionnés. L'âge moyen des sujets était de 76,7 ans (de 7 à 97 ans). Vingt-six genoux injectés au latex-néoprène ou à la gélatine colorée par de l'encre de Chine ont été disséqués. Cinq ménisques (2 ménisques issus d'un genou adulte, 3 ménisques issus de genoux d'enfants de 7 et 11 ans) ont été étudiés par immunohistochimie après marquage de CD31. Dix ménisques issus de 5 genoux injectés au sulfate de baryum ont été analysés en microtomodensitométrie. Les artères articulaires, les arcades péri-méniscales, les réseaux vascularisant les ménisques et la vascularisation intra-méniscale ont été décrits.

#### Résultats

Les artères articulaires supéro-médiale, supéro-latérale, inféro-médiale, inféro-latérale et moyenne étaient des artères constantes. Dans 55% des cas, il existait une artère articulaire moyenne accessoire. Une artère nommée « artère capsulo-méniscale médiale » était retrouvée sur tous les genoux disséqués. L'anatomie des arcades péri-méniscales était différente entre le versant latéral et le versant médial. L'artère principale de l'arcade péri-méniscale latérale était l'artère articulaire inféro-latérale, alors que c'était « l'artère capsulo-méniscale médiale » qui était l'artère principale de l'arcade péri-méniscale médiale. Chez l'adulte, les ménisques n'étaient vascularisés que sur leurs tiers périphériques (en moyenne, ménisque latéral : 25% périphérique [15;39], ménisque médial 35% périphérique [23;65]). Les ménisques de 7 et 11 ans avaient une zone vascularisée plus vaste que les ménisques adultes (en moyenne, ménisque latéral : 43% périphérique [34;49], ménisque médial : 48% périphérique [33;72]). Le segment de ménisque latéral en rapport avec le hiatus poplité et la jonction ménisco-capsulaire de la corne postérieure du ménisque médial semblaient avasculaires.

#### Discussion

Cette étude permet d'actualiser les connaissances de la vascularisation des ménisques. Pourtant, la description de la vascularisation intra-méniscale est encore incomplète. L'utilisation de la microtomodensitométrie parait être une excellente méthode pour obtenir une modélisation en 3 dimensions de la vascularisation intra-méniscale, les premiers résultats sont très encourageants.

#### MOTS-CLES

Anatomie, ménisque, artère articulaire, arcade péri-méniscale, vascularisation méniscale