Provided for non-commercial research and education use. Not for reproduction, distribution or commercial use.



This article appeared in a journal published by Elsevier. The attached copy is furnished to the author for internal non-commercial research and education use, including for instruction at the authors institution and sharing with colleagues.

Other uses, including reproduction and distribution, or selling or licensing copies, or posting to personal, institutional or third party websites are prohibited.

In most cases authors are permitted to post their version of the article (e.g. in Word or Tex form) to their personal website or institutional repository. Authors requiring further information regarding Elsevier's archiving and manuscript policies are encouraged to visit:

http://www.elsevier.com/copyright

#### Revue de chirurgie orthopédique et traumatologique (2009) 955, S310-S321



SYMPOSIUM, CONGRÈS SFA, PARIS, DÉCEMBRE 2008 : LE MÉNISQUE LATÉRAL

# Anatomie comparée du genou: conséquences pour le ménisque latéral<sup>☆</sup>

Comparative anatomy of the knee joint: Effects on the lateral meniscus

### C. Javois<sup>a</sup>, C. Tardieu<sup>b</sup>, B. Lebel<sup>c</sup>, R. Seil<sup>d</sup>, C. Hulet<sup>c,\*</sup>, la Société française d'arthroscopie

<sup>a</sup> Centre de chirurgie orthopédique et sportive, clinique du cours Dillon, 1, rue Peyrolade, 31300 Toulouse, France

<sup>b</sup> UMR 7179 « Mécanismes adaptatifs : des organismes aux communautés », USM 301 département EGB,

Muséum national d'histoire naturelle, pavillon d'anatomie comparée, 55, rue Buffon, 75005 Paris, France

<sup>c</sup> Département d'orthopédie, CHU de Caen, avenue Côte-de-Nâcre, 14033 Caen cedex, France

<sup>d</sup> Centre de l'appareil locomoteur, de médecine du sport et de prévention, centre hospitalier de Luxembourg,

clinique d'Eich, 78, rue d'Eich, 1460 Luxembourg, Luxembourg

#### Introduction

Replacé dans l'arbre évolutif des espèces, l'homme est un primate, un hominidé dont les proches cousins sont les grands singes (gibbon, orang, gorille et chimpanzé). Notre plus proche parent dans la nature actuelle est le chimpanzé. Nous partageons donc un ancêtre commun « récent » avec le chimpanzé. Cet ancêtre commun n'est ni un chimpanzé, ni un gorille, ni un homme. C'est par l'étude des fossiles et l'anatomie comparée qu'il a été possible de déterminer les dates de divergence des principaux rameaux de l'évolution. La divergence entre l'homme et le chimpanzé se situe à environ sept à dix millions d'années [1,2]. Notre lignée est

DOI de l'article original : 10.1016/j.otsr.2009.09.008.

Auteur correspondant.

étayée par différents fossiles plus ou moins bien conservés. Un des squelettes les plus connus et complets, découvert en Afrique de l'Est, appartient à une espèce particulière d'Australopithèques, l'*Australopithecus afarensis*, vieux de trois millions d'années.

Chez l'homme, le ménisque latéral et le ménisque médial se ressemblent partiellement mais ils présentent aussi des différences qui expliquent mieux la pathologie particulière du ménisque latéral. Il nous a semblé intéressant de remonter dans le temps afin de trouver dans l'étude de l'anatomie comparée et du développement embryologique ce qui rend le ménisque latéral si spécifique dans son anatomie et dans ses mécanismes physiologiques et pathologiques.

#### Anatomie comparée et évolution des espèces

Les premiers ancêtres de l'homme étaient à la fois arboricoles et terrestres. Parmi les primates, l'homme est le seul à pratiquer une marche bipède permanente et exclusive [3,4]. Pour comprendre l'évolution phylogénétique du genou, il est

<sup>\*</sup> Ne pas utiliser, pour citation, la référence française de cet article, mais celle de l'article original paru dans Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research, en utilisant le DOI ci-dessus. \* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : hulet-c@chu-caen.fr (C. Hulet).

<sup>1877-0517/\$ -</sup> see front matter © 2009 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés. doi:10.1016/j.rcot.2009.09.023



**Figure 1** Passage de la quadrupédie à la bipédie avec le développement du comportement érigé.

nécessaire de bien comprendre les bouleversements représentés par le passage de la vie arboricole à la vie au sol et le passage de la quadrupédie à la bipédie. La transition vers la bipédie exclusive chez l'homme a été accompagnée de modifications importantes [1].

Le bassin « en tension » des arboricoles est devenu un bassin « en pression » avec une diminution considérable de la distance séparant les articulations sacro-iliagues et coxofémorales et un fort élargissement du sacrum. Ces modifications de forme du bassin ont dû faire face au compromis difficile entre les contraintes de l'accouchement et de la bipédie. Le redressement du tronc s'est accompagné de l'acquisition de quatre courbures vertébrales, la courbure lombaire répondant à une incurvation inverse du sacrum. Au niveau de la hanche, le développement des grands fessiers a contribué à redresser le rachis. Le pied préhensile des primates a été converti en un pied d'appui et de propulsion, avec le rapprochement du premier et du second rayon, la constitution de deux voûtes plantaires, l'une longitudinale interne et l'autre transversale antérieure et l'horizontalisation de la surface articulaire tibiotalienne. Au niveau du genou, la flexion permanente de cette articulation chez les primates non humains, arboricoles et terrestres, a laissé place à la flexion-extension complète en appui, qui est une spécificité de l'homme.

Pour mieux comprendre l'anatomie du genou de l'espèce humaine, il est instructif de la comparer avec celle du genou d'autres primates et de fossiles hominidés. Le squelette de Lucy en association avec d'autres pièces attribuées à *A. afarensis* (trois millions d'années) comporte précisément des fémurs et des tibias très bien conservés, les insertions tibiales des ménisques étant intactes. Lucy est bipède au sol mais se déplace également dans les arbres. Son bassin et ses membres inférieurs ont subi de décisives modifications vers la bipédie. (Fig. 1) [1,3]. Chez le chimpanzé et tous les primates non humains, les genoux sont en abduction [4] (Fig. 2). L'homme est le seul à se tenir debout avec les fémurs en adduction [1,5,6,8–11]. Cette évolution a été marquée par trois modifications de notre squelette qui ont affecté la diaphyse fémorale, l'articulation fémoropatellaire et les condyles fémoraux.

## L'angle bicondylaire du fémur a permis la position adductée des genoux

Chez le chimpanzé et tous les primates non humains, la diaphyse fémorale est droite : l'axe du fémur est perpendiculaire à l'interligne articulaire du genou. L'acquisition d'une position en adduction des deux genoux a été réalisée grâce à la formation de l'angle bicondylaire du fémur ou angle d'obliquité fémorale [3,5,6,12–14]. Cet angle est déjà présent chez tous les australopithèques, il a permis de les diagnostiquer comme bipèdes. Pour les anthropologues, il traduit une des caractéristiques de la bipédie [7,8]. Cet angle est mesuré entre l'axe diaphysaire du fémur et la perpendiculaire au plan bicondylien en son milieu, soit le fond du sillon trochléen. Cet angle est différent de l'axe fémoral mécanique d'un à huit degré parfois (Fig. 3).

Tardieu a analysé l'ontogenèse de l'angle bicondylaire du fémur humain sur un échantillon de 25 radios du fémurs d'enfants de zéro à 13 ans et de fémurs infantiles issus de collections ostéologiques (Fig. 4) [2,10,11]. Cet angle est nul chez le nouveau-né, (Fig. 4 encart en haut à droite) la diaphyse fémorale est droite, l'angle d'obliquité fémorale n'existe pas. Le plan infradiaphysaire qui sépare l'épiphyse cartilagineuse de la diaphyse est parfaitement horizontal (Fig. 4). Sur les fémurs d'un fœtus de sept mois (angle obliquité 0°) et de quatre enfants de six mois (1°), de trois ans (5°), de sept ans (9°), on observe que cet angle se forme dans la partie diaphysaire indépendamment de la croissance de l'épiphyse distale du fémur. Il se produit une apposition métaphysaire médiale plus forte. Ce phénomène correspond



Figure 2 Passage du genou abducté au genou adducté chez l'homme.



**Figure 3** Fémurs d'un chimpanzé, d'un cercopithèque et d'un homme. Le fémur est droit chez les deux primates non humains. À l'inverse, le fémur humain est le seul à être oblique donc à permettre une position adductée des genoux [1,8].



**Figure 4** Angle d'obliquité fémorale sur des échantillons ostéologiques de fémurs infantiles.

à un phénomène morphogénétique exclusivement diaphysaire indépendant de la croissance épiphysaire distale. Cet angle se forme en lien avec l'apprentissage de la station debout et de la marche entre un et quatre ans. Il existe des variations importantes de cet angle ( $6^\circ$  à 14°) et les moyennes des différentes populations étudiées se situent entre 8° et 11°. La variabilité de cet angle peut être liée à la façon différente dont les très jeunes enfants mettent en charge leur squelette. Cet angle est souvent plus élevé chez la femme en lien avec une distance interacétabulaire plus grande. À l'inverse, l'analyse des radiographies de fémurs d'enfants non marchants montre que la diaphyse fémorale reste parfaitement droite et que l'angle bicondylaire est nul (Fig. 5). Chez l'homme, ce n'est donc pas le déport du col et de la tête fémorale qui crée la position oblique C. Javois et al.



**Figure 5** Radiographie de face d'un fémur d'un enfant non marchant. L'angle d'obliquité fémoral est nul.



**Figure 6** Bassin d'un Chimpanzé, de Lucy (*Australopithecus afarensis*) et de l'Homme.

de la diaphyse et l'adduction des genoux par rapport à l'articulation de la hanche. Chez tous les mammifères, la diaphyse fémorale est ainsi déportée en dehors par le col et la tête fémorale et le genou n'est pas adducté. Le fémur des autres mammifères ne présente jamais l'angle d'obliquité fémorale que l'on observe chez l'homme et ses ancêtres (Fig. 6) [1-3,13].

#### Le creusement de la trochlée fémorale avec une berge latérale plus haute prévient une dislocation latérale de la rotule

L'épiphyse distale du fémur du chimpanzé présente une trochlée plate qui ressemblerait à une dysplasie fémoropatellaire. Cette surface plate permet une grande liberté des déplacements de la rotule lors des fréquents mouvements de rotation du genou liés à un pied préhensile évoluant dans un milieu arboricole. Chez l'homme, la trochlée est creusée d'un sillon, la lèvre externe est plus haute et plus



Figure 7 Vue comparative épiphyses distales en vue inférieure d'un homme, d'un chimpanzé et de différents fossiles.

saillante antérieurement que la lèvre médiale. La trochlée fémorale s'adapte afin de stabiliser [12] l'articulation fémoropatellaire. Ce caractère est lié au précédent, il permet la stabilité médiolatérale de la patella en présence d'un angle d'obliquité fémorale élevé. Il est intéressant de constater que dès le stade du développement fœtal, l'ébauche cartilagineuse de l'épiphyse distale inférieure présente une trochlée plate chez le chimpanzé et une trochlée creusée avec une berge latérale plus haute chez l'homme [3] (Fig. 7). Cette évolution se retrouve chez *A. afarensis* il y a déjà trois millions d'années et est encore plus marquée chez *Homo habilis* plus proche de nous à 1,8 millions d'années (Fig. 7).

#### L'augmentation du rayon de courbure du condyle fémoral et du plateau tibial externes facilitent l'extension totale du genou

Une autre modification importante est la forme anatomique des structures osseuses du compartiment latéral (Fig. 8). Chez les primates non humains le profil sagittal du condyle externe est circulaire sans jonction ni saillie condylotrochléenne chez les primates. Cette forme circulaire ne favorise pas la position d'extension de l'articulation du genou. Le tibia ne remonte pas sur la zone trochléenne puisque l'extension du genou est inexistante ou très réduite.

Le profil du condyle externe devient elliptique chez l'homme. Cela correspond à une augmentation du rayon de courbure dans sa partie inférieure. Pour Kapandji [15], le rayon de courbure croit régulièrement d'arrière en avant jusqu'au point t et ensuite il commence à décroître. La partie postérieure au point t participe à la fémorotibiale latérale et la partie antérieure participe à la fémoropatellaire. Le rayon de courbure est maximum dans la zone de contact fémorotibial qui correspond à l'extension du genou [16]. Cette modification de la forme des condyles minimise la pression exercée sur le genou de façon préférentielle proche de l'extension ou en extension complète.

Chez les primates non humains, en regard du condyle latéral, le plateau tibial latéral est très convexe. L'association d'un condyle latéral « circulaire » et d'un plateau tibial latéral fortement convexe réduit la surface de contact entre les deux surfaces articulaires. Le compartiment latéral est très mobile et utile pour le déplacement arboricole et peu compatible avec l'extension en conditions de charge. Chez l'homme, cette forte convexité du plateau latéral a diminué : il n'est que légèrement convexe ce qui augmente la surface de contact fémorotibial. Le passage de la quadrupédie à la bipédie exclusive a induit un travail en extension du genou, avec réduction du polygone de sustentation, adduction du genou, creusement de la trochlée fémorale et transformation de la sphéricité du condyle latéral en ellipse, le genou devant gagner en stabilité tout en demeurant mobile.

## Quelles sont les conséquences de ces modifications osseuses sur le ménisque latéral ?

L'articulation du genou des primates et des mammifères contient deux ménisques [17–19]. Le ménisque médial est identique pour toutes les espèces avec une forme semicirculaire et deux insertions tibiales ; une antérieure et une postérieure [1,3,13].

Le ménisque latéral a une forme variable selon le type de primate. Chez les lémuriens, les tarsiers et les orangs-outans, le ménisque latéral semi-lunaire a une seule insertion antérieure à l'épine tibiale latérale. Chez les gibbons, gorilles et chimpanzés, le ménisque latéral a une forme annulaire avec une insertion tibiale unique antérieure à l'épine tibiale latérale (Fig. 9). Il existe une seule empreinte sur la surface osseuse tibiale et le bord postérieur du plateau tibial latéral est plus court et très abrupt. La forme du ménisque latéral est différente chez l'homme, elle



**Figure 8** Vue sagittale Condyle médial d'un genou de gorille (à gauche), condyle latéral d'un genou de gorille (au centre), vue condyle latéral humain (à droite, *Anatomy of the menisci*, R. Verdonk. ESSKA 2000 Basic Science Committee: *Knee anatomy for orthopaedic surgeons*). Il faut noter la différence de forme du plateau tibial qui de fortement concave en dedans devient fortement convexe pour le compartiment latéral.



Figure 9 Conséquences pour le ménisque latéral.

est semi-lunaire et surtout son insertion tibiale est double. Il existe une insertion tibiale antérieure et une insertion postérieure à l'épine tibiale latérale.

Sur le tibia humain, il existe deux zones d'insertions osseuses. Le bord postérieur du plateau tibial latéral est plus long, discontinu et marqué par l'empreinte de l'insertion postérieure du ménisque latéral. Chez Lucy (*A. afarensis*), l'insertion du ménisque latéral sur le tibia était encore unique, témoignant d'une mobilité plus grande du genou plaidant pour une vie encore partiellement arboricole. Chez les primates arboricoles dont le genou est presque toujours en flexion, cette forme du compartiment latéral explique la très grande mobilité du ménisque latéral. Les déplacements antéropostérieurs du ménisque latéral autour de son insertion [1,3,13] unique sont très importants. Précisons qu'il existe un ligament ménisco-fémoral chez tous les primates.

À l'inverse dans l'espèce humaine les modifications observées permettent de limiter le déplacement antéropostérieur du ménisque latéral et de renforcer la stabilité

en extension du genou qui est indispensable pour la bipédie exclusive. Cette insertion postérieure chez l'être humain, empêche un déplacement antérieur trop important du ménisque au cours des mouvements d'extension. Le ménisque latéral est sollicité fortement en avant dans les mouvements de rotation du fémur sur le tibia. Comme pour l'extension, cette insertion tibiale postérieure limite ce déplacement antérieur du ménisque latéral. Cette caractéristique est une spécificité unique à l'espèce humaine comparée à l'ensemble des mammifères vivants. Le développement des ligaments ménisco-fémoraux participe aussi à la stabilité du ménisque latéral dans les mouvements de flexion extension et de rotation. Cette évolution de l'insertion tibiale du ménisque latéral est à l'origine de l'occurrence chez l'homme de ménisques annulaires ou en croissant à insertion unique. Rappelons que la malformation congénitale la plus fréquente du ménisque latéral chez l'homme reste le ménisque discoïde, dans 1,5 à 4,6 % des cas. Ces formes et insertions découlent de l'évolution de notre espèce : elles sont donc déterminées génétiquement. Les ménisques discoïdes observés chez l'homme s'expliquent par la persistance chez certains sujets de la disposition observée chez les gibbons, le gorille et le chimpanzé, très proches de nous phylogénétiquement [19]. Ces modifications chez l'espèce humaine permettent de limiter le déplacement antéropostérieur du ménisque latéral et de renforcer la stabilité en extension du genou qui est indispensable pour la bipédie exclusive.

#### Ontogenèse des ménisques

Le ménisque latéral et le ménisque médial dérivent du même feuillet embryologique mésenchymateux du genou. Il s'agit de fibrocartilages semi-lunaires qui apparaissent dès le quatrième mois de gestation.

La vascularisation du ménisque est riche, plus particulièrement pour les cornes [20] et elle évolue au cours de la gestation. Initialement limitée au un tiers externe du



Figure 10 Étude radiographique des insertions méniscales.

ménisque médial ou latéral, elle évolue et progresse pour concerner à la naissance les deux tiers périphériques de l'ensemble du ménisque. Le récessus poplité avasculaire est présent dès la vie fœtale.

Leur composition histologique est identique (75% eau, 20% de fibres de collagène de type I et 5% de GAG). Classiquement, macroscopiquement, il s'agit de structures triangulaires et le ménisque médial a une force de «C» et le ménisque latéral a une forme de «O». Le diamètre des ménisques est de 35 mm et leur longueur mesurée sur le bord périphérique est en moyenne de  $110,86 \pm 13,18$  mm pour le ménisque médial et de  $111,15 \pm 11,07$  mm pour le ménisque latéral [21]. Le ménisque médial couvre en moyenne 64% (51 à 74%) de la surface articulaire tibiale et le ménisque latéral est plus recouvrant avec une moyenne de 84% (75à 98%) et ces valeurs sont constantes pendant la vie intrautérine et pendant la croissance [22]. Kohn et Moreno [21] ont étudié les insertions méniscales anatomiques sur 46 tibias cadavériques d'âge moyen 35 ans. L'aire d'insertion est de  $139\pm43\,mm^2\,pour$  l'insertion antérieure du ménisque médial et de  $80 \pm 10 \text{ mm}^2$  pour son insertion postérieure. Elles sont différentes pour le ménisque latéral,  $93 \pm 25 \text{ mm}^2$  pour l'insertion antérieure et  $115 \pm 51 \text{ mm}^2$  pour l'insertion postérieure. À partir de radiographies conventionnelles du genou de face et de profil, les insertions anatomiques des deux ménisques médiaux ont été définis et étudiés récemment par Wilmes et al. [23,24]. Ils ont ainsi pu déterminer simplement des repères fiables et reproductibles pour la latitude et la longitude du ménisque médial et du ménisque latéral en s'intéressant plus particulièrement au point d'insertion des cornes anatomiques. À partir de 20 tibias cadavériques et des radios de face et de profil, ils ont pu déterminer la position dans le sens latéro médial (Axe des X) et dans le sens antéropostérieur (Axe des Y) (Fig. 10). Ces positions sont constantes et les relations avec le massif des épines intercondyliennes sont étroites. Le ménisque médial à des insertions plus proches de la périphérie de la surface articulaire tandis que le ménisque latéral est plus refermé avec des insertions antérieure et postérieure assez rapprochées. Pour le ménisque latéral, l'insertion du segment antérieur est légèrement latéralisée par rapport à celle du segment postérieur dans un plan frontal. Dans un plan sagittal, ces insertions sont très proches puisque celle du segment antérieur se situe presque au milieu du plateau tibial latéral, alors que celle du segment postérieur est placée à la jonction trois quarts antérieurs, un quart postérieur. Il faut à ce propos garder en mémoire l'insertion unique du ménisque latéral chez le chimpanzé. Par ailleurs, le ménisque latéral repose sur un plateau tibial latéral convexe à l'inverse du ménisque médial.

#### Moyens de fixations ou d'unions du ML

En plus des insertions des cornes méniscales sur le plateau tibial, il existe des moyens d'unions variables.

En avant, il s'agit du ligament antérieur inter méniscal ou ligament de Winslow. Sa fréquence est variable en fonction du type d'étude [25–27]. Marcheix et al. [25] retrouvent, dans une étude cadavérique, ce ligament antérieur dans 100% des cas et seulement dans 80% des cas quand il est recherché par une IRM. Sa longueur moyenne est de 31,2 mm et sa largeur est seulement de 1,8 mm. Dans une autre étude cadavérique par Tubbs et al. [26], le ligament de Winslow a pu être identifié dans seulement 55% des cas avec des dimensions très voisines (35,4 mm de long sur 2,5 mm de large). Parfois ce ligament est double (3,7% des cas) et plusieurs types sont décrits en fonction de leur insertion associée sur le bord antérieur de la corne méniscale et de la capsule antérieure [27].

Ensuite, juste en avant du récessus poplité, Bozkurt et al. [28] ont analysé plus particulièrement la présence du ligament ménisco-fibulaire. Avec 50 dissections cadavériques, ils retrouvent un ligament ménisco-fibulaire qui unit le jonction ménisco-synoviale inférieure du segment moyen du ménisque latéral en avant du hiatus poplité jusqu'à la surface articulaire de l'articulation fibulo tibiale supérieure. L'épaisseur moyenne de ce ligament est de 3,84 mm (2,6 à 6,1 mm) et dépend de l'orientation de l'articulation fibulo tibiale. Ainsi, ce ligament participe à la stabilité du segment moyen dans les mouvements de rotation du tibia sous le fémur, ce d'autant que le segment moyen du ML est soumis à des contraintes sur le billot de la convexité du plateau tibial latéral. Obaid et al. [29] ont pu visualiser avec des séquences IRM en saturation de graisse ce ligament. C'est une structure sous la forme d'un hyposignal curviligne ou droit d'épaisseur variable qui part du bord inférieur du ML pour le surface articulaire de la fibula (Fig. 11). Cela correspond à la couche la plus profonde du ligament collatéral latéral et il est toujours en avant du hiatus poplité. Sur 152 IRM analysées rétrospectivement il a été clairement individualisé dans 42,5 % des cas et cette prévalence atteint 63% quand il y passage de liquide dans le récessus postéro latéral. On retrouve également la présence du ligament ménisco-fibulaire présent chez 80% des sujets et visible sur près de la moitié des IRM du genou en pratique quotidienne selon une récente étude de Bozkurt et al. [28] et de Obaid et al. [29]. Ce ligament ménisco-fibulaire est bien individualisé sur les coupes IRM sagittales en T2 et semble essentiellement développé à partir de la face inférieure du ménisque latéral. Retenons la présence d'un récessus poplité libre non-fixé ou ligament collatéral latéral qui est avasculaire.

Une autre spécificité du ménisque latéral est la présence des ligaments ménisco-fémoraux qui sont au nombre de deux: le ligament de Humphrey (LMF a) en avant du

C. Javois et al.



Figure 11 Aspect IRM en saturation de graisse du ligament ménisco-fibulaire de face et de profil en avant du récessus poplité.



**Figure 12** Vue anatomique postérieure (A redessiner) et vue postérieure du tibia et du ménisque latéral avec les insertions des ligaments ménisco-fémoraux (*Anatomy of the PCL and the menisco-femoral ligament*, A. Amis. ESSKA 2000 Basic Science Committee: *Knee anatomy for orthopaedic surgeons*).

LCP et le ligament de Wrisberg (LMF p) en arrière du LCP (Fig. 12 et 13).

Il s'agit de deux structures ligamentaires qui unissent le segment postérieur du ménisque latéral à la face latérale du condyle fémoral médial. Les ligaments ménisco-fémoraux ont été bien étudiés sur le plan anatomique et biomécanique par Amis et al., Masouros et al., Gupte et al. [30–34] et sont souvent analysés de façon conjointe avec le LCP. Leur présence est inconstante. Gupte [32] dans une étude importante de la littérature retrouve au moins un des deux LMF dans 91 % des cas sur 781 dissections anatomiques à partir de 13 études. Le LMF antérieur était retrouvé isolément



Figure 13 Vue IRM du LMF antérieur (images du bas) et postérieur (images du haut).

dans 48,2 % des cas et le LMF postérieur (LMF p) était présent isolément dans 70,4 %. Seuls 32 % des genoux avaient deux ligaments ménisco-fémoraux. Gupte et al. [32,33] suggèrent aussi que ces ligaments dégénèrent avec l'âge et que leur fréquence est plus grande chez les caucasiens que chez les asiatiques.

La zone d'insertion du LMF a est située sur le condyle fémoral médial entre la partie basse de l'insertion du LCP et le bord cartilagineux du condyle fémoral médial sous le LCP. La zone d'insertion du LMF p est située plus en arrière et en haut de l'insertion fémorale du LCP au dessus du LCP [30]. La longueur du LMF oscille entre 21 et 27 mm en fonction du sexe et des études. Le LMF p est plus long entre 23 et 31 mm [32,33]. Gupte et al. [35] ont évalué dans une étude observationnelle en arthroscopie avec le «méniscal tug test» les insertions des ligaments méniscofémoraux et leurs connections avec le ménisque latéral. Techniquement, il s'agit avec le crochet pâleur de tirer sur le ligament ménisco-fémoral antérieur et d'observer alors un mouvement de la racine méniscale du ménisque latéral. La visualisation du LMF p est plus difficile car il est en arrière du LCP. Ainsi sur 68 genoux, le LMF antérieur a été identifié dans 68% des cas [27] et le LMF p a été seulement mis en évidence dans 15% des cas. Les études IRM sur les ligaments ménisco-fémoraux sont très discordantes [36] mais anciennes (Fig. 13). La présence des LMF est trop inconstante car la difficulté réside à passer dans le plan de coupe des LMF [37] (Tableau 1).

Au début des travaux anatomiques descriptifs, les ligaments ménisco-fémoraux ont décrits comme un « troisième croisé». Leur résistance et leur module d'élasticité sont importants en comparaison avec la résistante des deux faisceaux du LCP (Faisceau antérieur du LCP 1620 N, 248 MPa, faisceau postérieur du LCP 258N et 145 MPa [34]). Leur résistance représente 30% de la résistance du LCP et est équivalente au faisceau postérieur du LCP. Les études biomécaniques ont montré que les LMF ont 30% de la contrainte ultime du LCP. Moran [38] a étudié les variations de tensions au cours des mouvements de flexion pour les deux ligaments ménisco-fémoraux. Pour le LMF a, la tension est nulle en extension et débute à 10, 20 degrés de flexion, et atteint son maximum à 105° de flexion. Cette mise en tension est augmentée significativement lors d'un mouvement de rotation externe tibiale. À l'inverse, le LMF p a une tension maximale en extension et ensuite sa tension diminue progressivement au fur et à mesure que la flexion augmente. Elle est nulle à 80° de flexion. La mise en tension des deux LMF ensemble est plus complexe. Initialement la tension est importante en extension et décroît vers 30° de flexion mais augmente beaucoup de nouveau en fin de flexion. Selon les travaux d'Amadi [39], la présence de ces ligaments ménisco-fémoraux intact diminue de 10% contraintes fémoro-tibiales latérales et limite la translation postérieure tibiale.

En extension, le LMF p est tendu en extension et le LMF ant est détendu. En flexion, le LMF p se détend alors que le LMF antérieur se tend au cours de la flexion [39].

Le LMF a stabilise le segment post du ML en flexion et le LMP post le stabilise en extension. Aussi au cours de la flexion, les LMF déplacent la corne postérieure du ML en avant et en dedans. Ils s'opposent à son déplacement postérieur trop important. Gupte et al. [40] ont décrit une relation antagoniste entre les ligaments méniscofémoraux et les ligaments ménisco-fibulaires en avant du hiatus poplité. Le ligament ménisco-fibulaire tire le segment post en arrière en dd, tandis que la traction effectuée par les LMF est dirigée en avant en dedans et plus proximale c'est-à-dire en avant dans le sens antéropostérieur. Ces ligaments ménisco-fémoraux sont des antagonistes du déplacement postérieur naturel au cours de la flexion.

Ainsi, au cours d'un mouvement de rotation interne tibiale sur un genou fléchi, les LMF tirent le segment post en en avant et en dedans, tandis que les ligament méniscofibulaire, le maintien en arrière afin de le protéger du condyle fémoral latéral.

En extension, au cours d'un mouvement de compression axiale, les contraintes transmises ont tendance à vouloir expulser le ménisque latéral en dehors. Les forces de compressions se transforment en force de cisaillement et sont transmises par les LMF aux fibres circonférentielles du ML. Si les contraintes sont trop importantes, un des éléments de la chaîne LMF-racine méniscale et segment post peux rompre et une lésion méniscale ou ligamentaire peut survenir.

Ces ligaments méniscaux fémoraux sont le deuxième frein de la translation tibiale postérieure après le LCP mais, ils ont un rôle important de stabilisateur du segment et de la racine méniscale latérale quand celle ci est mise en compression sur la convexité du plateau tibial  $\pm$  latéral.

En dernier lieu, le ménisque latéral est inclus dans cette entité anatomofonctionnelle qu'est le point d'angle postérolatéral. Celui-ci est composé du ligament poplitéofibulaire, du muscle poplité, du ligament collatéral latéral, du biceps crural et de la capsule articulaire postérieure.

#### Cinétique des ménisques

Ainsi, l'ensemble de ces moyens d'insertions et la surface convexe du PT latéral permet de mieux comprendre le déplacement des ménisques. Le déplacement du ménisque latéral est plus important que celui du ménisque médial.

Jusqu'à 90° de flexion du genou, Vedi et al. [40] ont montré que le ML se déplace de 9,5, 3,7 et 5,6 mm en arrière pour respectivement le segment antérieur, le segment moyen et le segment postérieur. Le déplacement postérieur naturel des ménisques au cours de la flexion est plus important [41] pour le ménisque latéral que pour le ménisque médial et peut atteindre jusqu'à 10 mm pour la corne antérieure.

 Tableau 1
 Les propriétés mécaniques de ces deux structures ont été bien définies.

	Aire insertion (mm <sup>2</sup> )	Résistance (N)	Module élasticité (MPa)	Longueur (mm)
LMF ant	14,7 ± 14,8	300 ± 155	281 ± 239	20,7 ± 3,9
LMF post	$20,9 \pm 11,6$	$302\pm158$	$227 \pm 128$	$\textbf{23,0} \pm \textbf{4,3}$

#### S318



**Figure 14** Recul en IRM dynamique du segment ant et post des ménisques au cours de la flexion supérieure à 120°.

Récemment, Yao et al. [41] ont pu étudier la translation postérieure en réalisant une flexion supérieure à  $130^{\circ}$ . La translation postérieure globale in vivo est de  $8,2 \pm 3,2$  mm pour le ML contre  $3,3 \pm 1,5$  mm pour le ménisque médial. La translation postérieure des cornes antérieure (ML : 10,2 mm, MM: 6,5 mm) est plus importante que celle des cornes postérieures (ML: 6,2 mm, MM: 3,1 mm). La différence de translation moyenne entre les deux ménisques est importante, presque de 5 mm.

Nous avons réalisé une étude avec cinq genoux sains en positionnant le genou d'abord en extension puis avec des paliers successifs de 30° et l'objectif est d'obtenir plus de 100 degrés de flexion. Nous avons calculé pour chaque position de profil le recul du segment antérieur et du segment postérieur par rapport au cercle qui représente le rayon de courbure fémoral postérieur qui correspond au plus grand diamètre du condyle fémoral latéral [42]. Le recul du segment postérieur et du segment antérieur a ainsi pu être mesuré entre la position d'extension et la position de flexion maximale du genou. La translation postérieure du ML est très supérieure à celle mesurée pour le ménisque médial. La translation postérieure est de respectivement 15 et 16 mm pour les segments antérieurs et postérieurs du ML contre seulement 8 et 5 mm pour les segments antérieur et postérieurs du MM (Fig. 14).

Ces observations sont constantes sur les cinq genoux que nous avons analysés ; dans tous les cas le segment postérieur du ménisque latéral, passé 90° de flexion, s'exclut en arrière du plateau tibial latéral, alors que le segment postérieur du ménisque médial reste en permanence à l'aplomb du bord postérieur du plateau tibial—médial.

#### Réflexion sur la physiopathologie des lésions du ménisque latéral

Le ménisque latéral optimise la congruence articulaire, dans un compartiment fémoro-tibial hostile du fait de ses convexités opposées. Il participe, notamment par les interconnexions du point d'angle postérolatéral, à la stabilité du genou et conserve, du fait de son évolution phylogénétique, une mobilité importante. On dit d'ailleurs souvent que le



**Figure 15** Mécanismes physiopathologiques des lésions méniscales latérales.

compartiment latéral est celui de la mobilité. L'essentiel des contraintes sur le ménisque latéral s'exerce sur les segments antérieur et postérieur comme le montraient les travaux de Moyen [43]. Sa situation et sa morphologie contribuent à transformer les charges de compression en force de cisaillement, comme cela a été bien établi par l'étude de la SFA en 1996 [43]. Le ménisque latéral absorbe donc les chocs en répartissant circonférentiellement les charges compressives. Ses récepteurs proprioceptifs sont d'ailleurs situés sur les deux tiers périphériques et les segments antérieur et postérieur. On voit apparaître les mécanismes lésionnels potentiels avec leurs conséquences en termes de surcharge de contraintes.

Les contraintes dans le compartiment médial sont donc essentiellement en compression. Dans le compartiment latéral, les contraintes en compression associées au plus grand déplacement fait que le ML est l'objet de contraintes en cisaillement sur le billot de la convexité du plateau tibial-latéral. En fonction de la nature et l'importance du traumatisme, les lésions sont différentes. À l'occasion d'un traumatisme associant valgus, flexion et rotation externe, l'opposition entre la poussée du condyle latéral renforcée par la traction antérieure des ligaments ménisco-fémoraux, et la traction postérieure du ligament ménisco-fibulaire et de la capsule, se traduit notamment en flexion par une subluxation postérieure du plateau tibial latéral. La convexité du plateau tibial-latéral fait donc billot sur un ménisque étroit et mobile au regard du récessus poplité, ce qui induit un mouvement de cisaillement (Fig. 15).

Si le ligament croisé antérieur (LCA) est intact, la translation n'est pas très importante et le cisaillement se fera sur le segment moyen en regard du récessus poplité. C'est ce que confirment les études cliniques dans l'analyse des lésions méniscales sur genou stable.

Si le LCA est rompu, la translation est exagérée et le mouvement billot avec une contrainte élevée en cisaillement s'exercera sur le segment postérieur du ménisque latéral. Dans ces circonstances, les ligaments ménisco-fibulaires, les ligaments ménisco-fémoraux en fonction du degré de flexion du genou et la racine du ménisque latéral sont fortement exposées au risque d'une lésion.



Figure 16 Les 6 coupes pour analyser les racines méniscales et présence d'une lésion de la racine du ML.

West et al. [44] ont rapporté dès 2004 ce type de lésion de la racine méniscale latérale associée à des ruptures du LCA. Cette lésion était retrouvée dans 12,4% des cas. Brody et al. [45] ont bien décrit les caractéristiques en IRM des racines méniscales en T1 et en T2. À partir de 264 IRM faites chez des patients qui ont une rupture du LCA, il retrouve 9,8% de lésions de la racine du ML et seulement 3% de lésions de la racine du ML (23%). Une absence du LMF était souvent associée à une extrusion du ML quand il existait une lésion de la racine du ML. Cela souligne la difficulté de bien visualiser les racines méniscales et aussi les ligaments ménisco-fémoraux [46–49].

De Smet et al. [50] ont défini des critères IRM avec six coupes (trois frontales et trois sagittales) (Fig. 16) en saturation de graisse T2 afin de bien visualiser les racines méniscales. Il faut utiliser des coupes successives de 3 mm



**Figure 17** Vue arthroscopique d'une lésion de la racine du ménisque latéral.

d'épaisseur avec une interpolation de 1,5 mm. En utilisant cette technique et en analysant bien ces six coupes fines, il est plus aisé d'identifier une lésion de la racine du ML.

Ahn et al. [51] ont bien montré que ces lésions sont souvent dans un plan frontal et qu'elles entrainent une rupture de la continuité du segment postérieur du ML qui perd ainsi son attache tibiale (Fig. 17). Cette lésion est définie comme étant à moins de 1 cm de la zone d'insertion tibiale. La fréquence de ces lésions est de seulement 6,7% dans son analyse de 432 greffes du LCA. Ahn et al. [51] proposent à chaque fois que possible un geste de réparation méniscale même pour les lésions qui vont jusqu'en zone blanc blanc. Avec un contrôle arthroscopique, il a toujours observé une cicatrisation méniscale et la situation de la racine du ML du fait de ses deux insertions (LMF et insertion tibiale) rend la technique de réparation plus difficile que pour une lésion verticale du segment moyen. Il faut savoir rechercher ces lésions et y porter un intérêt croissant.

#### Conclusion

L'utilisation par Homo sapiens de la bipédie exclusive permet de mieux comprendre les différences anatomiques entre les deux compartiments du genou. Les conséquences sur le ménisque latéral sont beaucoup plus importantes que celles observées au ménisque médial qui reste identique quel que soient les espèces. La double insertion du ménisque latéral est une caractéristique unique pour Homo sapiens. Avec l'étude de l'anatomie en confrontant des dissections et des moyens d'imagerie récents, il existe des repères fiables en imagerie moderne, radiologie numérique et notamment en IRM, qui peuvent vraisemblablement faciliter la réalisation des allogreffes méniscales. La possibilité de mettre en évidence par des moyens d'imagerie moderne une anatomie fonctionnelle permet d'apprécier plus finement la cinématique du genou et notamment du ménisque latéral. Cela contribue à faciliter la compréhension de la biomécanique des ménisques et ainsi de mieux cerner leurs mécanismes lésionnels. Il faut désormais mettre au point des protocoles d'imagerie très précis afin de mieux analyser les LMF (surtout le postérieur), les lésions du LCA et les racines méniscales et quantifier les liens avec l'extrusion méniscale. En définissant de façon plus précise et exhaustive les lésions associées aux lésions du LCA, nous pourrons améliorer nos indications thérapeutiques et nos techniques de conservation méniscale.

#### Références

- Tardieu C. L'articulation du genou chez les primates. Cahiers de paléontologie. Paris: Presses du CNRS; 1983., ISBN 2-222-03213-X.
- [2] Rouvillain JL, Tardieu C. Apport de l'anatomie comparée à la compréhension de l'articulation du genou chez l'homme. Maîtrise Orthop 2000;96:1–6.
- [3] Tardieu C. Ontogeny and phylogeny of femoro-tibial characters in humans and hominid fossils: functional influence and genetic determinism. Am J Phys Anthropol 1999;110(3): 365–77.
- [4] Tardieu C. L'articulation du genou des Primates catarhiniens et Hominidés fossiles. Implications phylogénétique et taxinomique. In «Les Australopithèques». Actes de deux séances de la Société d'Anthropologie de Paris sur le thème : ''Australopithèques''. Bull Mem Soc Anthrop Paris 1983;(10-3):355–72.
- [5] Shefelbine SJ, Tardieu C, Carter DR. Development of the femoral bicondylar angle in hominid bipedalism. Bone 2002;30(5):765–70.
- [6] Tardieu C, Preuschoft H. Ontogeny of the knee joint in humans, great apes and fossil hominids: pelvi-femoral relationships during postnatal growth in humans. Folia Primatol (Basel) 1996;66(1-4):68–81.
- [7] Tardieu C. L'angle bicondylaire du fémur est-il homologue chez l'homme et les primates non humains? Réponse ontogénétique. Bull Mem Soc Anthrop Paris 1993;5:159–68.
- [8] Tardieu C. Morphogénèse de la diaphyse fémorale chez l'homme. Signification fonctionnelle et évolutive. Folia Primatol 1994;63:53–8.
- [9] Tardieu C, Trinkaus E. Early ontogeny of the human femoral bicondylar angle. Am J Phys Anthropol 1994;95(2):183-95.
- [10] Tardieu C. Morphogenesis of the femoral diaphysis in humans: significance of function and evolution. Folia Primatol (Basel) 1994;63(1):53-8.
- [11] Tardieu C, Damsin J-P. Evolution of the angle of obliquity of the femoral diaphysis during growth. Correlations Surg Radiol Anat 1997;19:91–7.
- [12] 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 2001;87(4):373-83.
- [13] Tardieu C. Evolution of the knee intra-articular menisci in primates and some fossil hominids. In Primate evolution. In: Else J, Lee P, editors. Primate. Evolution. Cambridge University Press; 1986. p. 183–90.
- [14] Tardieu C. Short adolescence in early hominids: infantile and adolescent growth of the human femur. Am J Phys Anthropol 1998;107(2):163-78.
- [15] Kapandji IA. Physiologie articulaire. In: Membre inférieur Fascicule II. Paris: Librairie Maloine; 1977.
- [16] Frain P. Geometric and kinetic factors linking the médial fémoral condyle and the médial ligament of the knee. Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot 1980;66(4):285–95.
- [17] De Fénis F. Note sur la formation et la disparition des ménisques intra-articulaires du genou. Bull Mem Soc Anthrop Paris 1918;9:19–32.

- [18] Haines RW. The tetrapod knee joint. J Anat 1942;76:270-301.
- [19] Le Minor J-M. Morphologie comparée des ménisques du genou chez les Primates. Implications concernant l'origine des anomalies méniscales chez l'homme. Thèse de Médecine, 1989, Université de Paris-Sud.
- [20] Belot D, Geffard B, Lebel B, Lautridou C, Abadie P, Locker B, et al. Human meniscus vascularisation supply during foetal development: about 16 cases. KSSTA 2008;16(suppl 1).
- [21] Kohn D, Moreno B. Meniscus insertion anatomy as a basis for meniscus replacement: a morphological cadaveric study. Arthroscopy 1995;11:96–103.
- [22] Clark CR, Ogden JA. Development of the menisci of the human knee joint: morphological changes and their potential role in childhood injury. J Bone Joint Surg [Am] 1983;(65-A): 538-47.
- [23] Wilmes P, Anagnostakos K, Weth C, Kohn D, Seil R. The reproductibility of radiographic measurement of medial meniscus horn position. Arthroscopy 2008;24:660–8.
- [24] Wilmes P, Pape D, Khone D, Seil R. The reproductibility of radiographic measurement of lateral meniscus horn position. Arthroscopy 2007;23:1079–86.
- [25] Marcheix PS, Marcheix B, Siegler J, Bouillet P, Chaynes P, Valleix D, et al. The anterior intermeniscal ligament of the knee: an anatomic and MR study. Sur Radiol Anat 2009;31(5):331–4.
- [26] Tubbs RS, Michelson J, Loukas M, Shoja MS, Ardalan MR, Salter EG, et al. The transverse genicular ligament: anatomical study and review of the literature. Surg Radiol Anat 2008;30:5–9.
- [27] Aydingöz U, Kaya A, Atay OA, Oztürk MH, Doral MN. MR imaging of the anterior intermeniscal ligament: classification according to insertion sites. Eur Radiol 2002;12:824–9.
- [28] Bozkurt M, Elhan A, Tekdemir I, Tönuk E. An anatomical study of the meniscofibular ligament. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc 2004;12(5):429–33.
- [29] Obaid H, Louise Gartner L, Haydarb AA, Briggs TWR, Saifuddin A. The meniscofibular ligament: An MRI study. Eur J Radiol 2008, doi:10.1016/j.ejrad.2008.09.026.
- [30] Amis AA, Gupte CM, Bull AMJ, Edwards A. Anatomy of the posterior cruciate ligament and the meniscofemoral ligaments. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc 2006;14:257–63.
- [31] Masouros SD, McDermott ID, Amis ID, Bull AMJ AA. Biomechanics of the meniscus-meniscal ligament construct of the knee. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc 2008;16:1121–32.
- [32] Gupte CM, Smith A, McDermott ID, Bull AMJ, Thomas RD, Amis AA. Meniscofemoral ligaments revisited. Anatomical study, age correlation and clinical implications. J Bone Joint Surg Br 2002;84:846–51.
- [33] Gupte CM, Bull AM, Thomas RD, Amis AA. A review of the function and biomechanics of the meniscofemoral ligaments. Arthroscopy 2003;19:161–71.
- [34] Amis AA, Bull AMJ, Gupte CM, Hijazi I, Race A, Robinson JR. Biomechanics of the PCL and related structures: posterolateral, posteromedial and meniscofemoral ligaments. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc 2003;11:271–81.
- [35] Gupte CM, Bull AM, Henry D, Atkinson Thomas RD, Strachan RK, Amis AA. Arthroscopic appearances of the meniscofemoral ligaments: introducing the ''meniscal tug test''. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc 2006;14:1259–65.
- [36] Erbagci H, Yildirim H, Kizilkan N, Gumusburun E. An MRI study of the meniscofemoral and transverse ligaments of the knee. Surg Radiol Anat 2002;24:120–4.
- [37] Gupte CM, Smith A, Jamieson N, Bull AMJ, Thomas RD, Amis AA. Meniscofemoral ligaments—structural and materialproperties. J Biomech 2002;35:1623–9.
- [38] Moran CJ, Poynton AR, Moran R, Brien MO. Analysis of Meniscofemoral Ligament Tension During Knee Motion Arthroscopy. J Arthrosc Relat Surg 2006;22(4):362-6.
- [39] Amadi HO, Gupte CM, Lie DT, McDermott ID, Amis AA, Bull AMJ. A biomechanical study of the meniscofemoral ligaments and

their contribution to contact pressure reduction in the knee. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc 2008;19:1004–8.

- [40] 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 1999;81:37–41.
- [41] Yao J, Lancianese S, Hovinga K, Lee J, Lerner AL. Magnetic resonance image analysis of meniscal translation and tibiomenisco-femoral contact in deep knee flexion. J Orthop Res 2008;26:673–84.
- [42] Iwaki H, Pinskerova V. Freeman Mar. Tibiofemoral movement 1: the shapes and relative movements of the femur and tibia in the unloaded cadaver knee. J Bone Joint Surg Br 2000;82:1189–95.
- [43] Moyen B, Daroussos N, Dimnet J, BesseJL, Lerat JL. Les ménisques: données fondamentales actuelles. Sauramps Ann Soc Fr Arthrosc SFA 1996;1997:111–4.
- [44] West RV, Kim JG, Armfield D, Harner CD. Lateral meniscal root tears associated with anterior cruciate ligament injury: classification and management(SS-70). Arthroscopy 2004;20(supplément 1):e32–3.
- [45] Brody JM, Hank ML, Hulstyn MJ, Tung GA. Lateral Meniscus Root Tear and Meniscus Extrusion with Anterior Cruciate Ligament Tear. Radiology 2006;239(3):805–10.

- [46] Brody JM, Hulstyn MJ, Fleming BC, Tung GA. The Meniscal Roots: Gross Anatomic Correlation with 3-T MRI Findings? AJR 2007;188:W446-50.
- [47] Brody JM, Lin HM, Hulstyn MJ, Tung GA. Lateral meniscus root tear and meniscus extrusion with anterior cruciate ligament tear. Radiol 2006;239:805–10.
- [48] Park LS, Jacobson JA, Jamadar DA, Caoili E, Kalume-Brigido M, Wojtys E. Posterior horn lateral meniscal tears simulating meniscofemoral ligament attachment in the setting of ACL tear: MRI findings. Skeletal Radiol 2007;36:399–403, doi:10.1007/s00256-006-0257-3.
- [49] De Smet AA, Mukherjee R. Clinical, MRI, and Arthroscopic Findings Associated with Failure to Diagnose a Lateral Meniscal Tear on Knee MRI. AJR 2008;190: 22–6.
- [50] De Smet AA, Blankenbaker DG, Kijowski R, Graf BK, Shinki K. MR diagnosis of posterior root tears of the lateral meniscus as using arthroscopy as the reference standard. AJR 2009;192: 480–6.
- [51] Ahn JH, Lee YS, Chang JY, Chang MJ, Eun SS, Sang MK. Arthroscopic all inside repair of the lateral meniscus root tear. Knee 2009;16:77–80.