

## Origine des dysplasies de la trochlée fémorale

### Anatomie comparée, évolution et croissance de l'articulation fémoro-patellaire

#### *The origin of femoral trochlear dysplasia: comparative anatomy, evolution, and growth of the patellofemoral joint*

C. Tardieu \*, J.-Y. Dupont \*\*

\* CNRS UMR 8570, Laboratoire d'Anatomie Comparée, Muséum National d'Histoire Naturelle, 55, rue Buffon, 75005 Paris.

\*\* Clinique Saint-Michel et Sainte-Anne, 88, rue de Kerjestin, 29000 Quimper.

#### ABSTRACT

We performed a comparative analysis of the femoropatellar morphology examining the evolutionary aspects to search for the origin of trochlear dysplasia. Trochlear dysplasia is frequent in the human population and, when associated with morphological and positional abnormalities of the patella, can lead to patellar pain syndrome in minor cases or patellar dislocation in severe cases. There is no strict relationship between the observed anomalies and clinical expression.

The shape of the articular surfaces is variable in mammals depending on their type of locomotion: unguligrade, digitigrade, plantigrade. In greater apes, the femoral diaphysis is straight and the trochlea is flat and symmetrical. The patella does not tend to dislocate laterally since the knee under load is always flexed. In human adults, the femoral diaphysis has a valgus obliquity angle of 8° to 10°. Consequently, the trochlea has a deepened sulcus and an elevated lateral lip, avoiding lateral patellar dislocation, especially during initial knee flexion. In the human newborn, the femoral diaphysis is vertical. As the child starts walking, the femoral obliquity angle develops between 1 and 7 years of age, inducing a secondary valgus of the extensor apparatus. This obliquity does not develop in non-walking children. Fossil femurs of australopithecus demonstrate that a high obliquity angle had appeared more than 3 million years ago, but also exhibit a poorly deepened trochlea and a slight elevation of the lateral facet. At 1.8 million years, the fossils have the oblique diaphysis, the strongly deepened sulcus and the strongly elevated lateral facet. The obliquity angle of the femoral diaphysis is the leading feature which initiated the later modifications of the patellofemoral joint that over 3 million years were never inscribed in the human genome. Lateral trochlear lip and deep sulcus are features that were first acquired, then once selected, genetically assimilated, and now appear on the fetal cartilaginous epiphysis.

**Key words:** Femoral trochlea, dysplasia, comparative anatomy, embryology of the knee.

#### RÉSUMÉ

La morphologie de l'articulation fémoro-patellaire est présentée dans une perspective comparative et évolutive visant à apporter un éclairage nouveau au problème de l'origine des dysplasies trochléennes. Ces dysplasies favorisent souvent mais non constamment, en association avec les anomalies morphologiques et positionnelles de la rotule, les épisodes de symptomatologie rotulienne : syndrome douloureux rotulien dans les cas mineurs, luxation de rotule dans les cas majeurs. Il n'existe pas de relation stricte entre anomalies et symptômes car ces problèmes sont multifactoriels.

La forme des surfaces articulaires varie chez les mammifères en fonction de leur locomotion onguligrade, digitigrade ou plantigrade. Chez les grands singes, la diaphyse fémorale est droite et la trochlée plate et symétrique. La rotule n'a pas tendance à se luxer car le genou en charge est toujours fléchi. Chez l'homme adulte la diaphyse fémorale présente un angle élevé d'obliquité (8° à 10°). Du fait de la présence de cet angle, la trochlée est normalement creusée d'un sillon et présente une lèvre externe plus saillante, permettant d'éviter une luxation externe de la rotule, lors de l'engagement en particulier. Chez le nouveau-né humain, la diaphyse est en rectitude. L'angle d'obliquité se forme entre 1 an et 7 ans environ, en lien avec l'apprentissage de la marche, entraînant la mise en valgus de l'appareil extenseur. Il ne se forme pas chez des enfants non marchants. Les fémurs fossiles des australopitèques présentent dès 3 millions d'années un angle d'obliquité élevé, mais une trochlée très faiblement creusée et une lèvre externe peu saillante. A 1,8 million d'années, les fossiles présentent déjà, associés à l'angle d'obliquité fémorale, une trochlée très creusée et une lèvre externe très

*Tirés à part* : C. TARDIEU, à l'adresse ci-dessus.

E-mail : tardieu@mnhn.fr

Acceptation définitive le : 6 décembre 2000

saillante. L'angle d'obliquité externe du fémur, caractère leader qui a accompagné la bipédie et initié les modifications subies ensuite par l'articulation fémoro-patellaire, n'a jamais été inscrit dans le génome depuis 3 millions d'années. Saillie externe et sillon trochléen sont des caractères qui ont d'abord été « acquis ». Puis, sélectionnés, ils ont été « assimilés génétiquement », i.e. qu'ils apparaissent sur l'épiphyse cartilagineuse dès le stade fœtal.

**Mots clés :** Genou, trochlée fémorale, dysplasie trochléenne, embryologie du genou, anatomie comparée du genou.

## INTRODUCTION

Les relations entre dysplasies de la trochlée fémorale et problèmes cliniques fémoro-patellaires ont été mises en évidence depuis de nombreuses années [Albee (1), Brattström (2, 3), Goldthwait (4)]. Dejour *et al.* (5) ont même fait de ces dysplasies trochléennes la pierre angulaire de leur classification des problèmes cliniques fémoro-patellaires. Les publications les plus classiques [Goutallier (6)] apportent une vision statique, bidimensionnelle et paucifactorielle et non une approche dynamique, tridimensionnelle et multifactorielle. Nos travaux récents [Dupont (7, 8, 9)] ont cherché à mieux préciser l'épidémiologie de ces dysplasies trochléennes, ainsi que l'importance respective de facteurs anatomiques associés et liés, plus spécifiquement rotuliens, comme la morphologie de la rotule, son degré de rotation, sa hauteur en extension.

Nous avons dans cet esprit réalisé une étude prospective clinique et radiologique utilisant la radiologie du genou de profil [Maldague et Malghem (10)], portant sur 700 patients divisés en 4 groupes : 1) 393 témoins asymptomatiques fémoro-patellaires et sans antécédents cliniques de ce type (ni douleurs, ni luxations), ayant pour l'essentiel une pathologie ménisco-ligamentaire ; 2) 50 patients présentant des douleurs antérieures de genou (SDAG) où était impliquée une pathologie spécifique (plica interne, tendinite rotulienne, ostéochondrite disséquante de la rotule, patella bipartita, etc.) ; 3) 190 patients présentant des douleurs antérieures du genou, dont 104 avaient un syndrome rotulien douloureux (SDR) bilatéral, chez lesquels aucune pathologie spécifique n'était démontrée [Dupont (7)] ; 4) 67 luxations récidivantes de rotule, dont 39 bilatérales. Le *tableau I* indique la fréquence des trochlées

normales et dysplasiques sur le cliché de profil du genou selon la classification de Dejour dans ces 4 groupes. Les résultats les plus remarquables étaient :

- une fréquence de 14,9 % de dysplasies trochléennes chez les témoins et un même pourcentage dans les SDAG spécifiques, qui se comportent donc sur ce point comme les témoins, ces derniers sont donc regroupés sur le *tableau I* avec les témoins ;

- un pourcentage significativement plus élevé dans les SDR non spécifiques (32,6 %) ;

- une fréquence très élevée dans les luxations récidivantes de rotule (77,6 % de trochlées dysplasiques et 7,5 % de trochlées inclassables qui pourraient être, elles aussi dysplasiques) sans que nous puissions dire, à la différence de Dejour (5), que les dysplasies trochléennes sont constantes dans ce type de problèmes.

On observait une symétrie radiologique de 97 % en ce qui concerne l'aspect dysplasique, que la symptomatologie soit uni ou bilatérale. Le genou asymptomatique dans les cas unilatéraux avait donc les mêmes anomalies morphologiques que le genou symptomatique.

Dans cette étude, les anomalies morphologiques dans les SDR se présentaient quantitativement et qualitativement comme intermédiaires entre celles des témoins et celles des luxations [Dupont (9)], quelle que soit l'anomalie radiologique recherchée (morphologie de la rotule ou de la trochlée, anomalie positionnelle de la rotule). Cette étude souligne la grande variabilité de l'anatomie fémoro-patellaire, dont certains types semblent prédisposer à la genèse de symptômes, sans que la relation entre anomalies et douleurs ou luxations soit stricte. On ne peut donc plus parler de pathologie fémoro-patellaire au sens strict. Nous

TABLEAU I. — Fréquence des types de trochlées selon la classification de Dejour chez 700 patients.

Trochlées	A-B	1	2	3	Total dysplasiques	Autres types	Total
Luxations	10 (14,9 %)	21	14	17	52 (77,6 %)	5 (7,5 %)	67
SDR	101 (53,2 %)	26	33	3	62 (32,6 %)	27 (14,2 %)	190
Témoins	299 (67,5 %)	35	29	2	66 (14,9 %)	78 (17,6 %)	443
Total	410	82	76	22	180	110	700

Les types A et B sont considérés comme normaux, les types 1, 2 et 3 sont dysplasiques. Les trochlées ne rentrant pas dans cette classification sont comptabilisées comme « autres types » et pourraient aussi bien être normales que dysplasiques. L'ensemble des 443 témoins regroupent 393 témoins stricts et 50 syndromes douloureux antérieurs du genou (SDAG) qui présentent la même fréquence de dysplasies que les témoins stricts (14,9 %). SDR : syndrome douloureux rotulien.

avons décrit ces anomalies morphologiques comme étant multifactorielles et à expression clinique variable [Dupont (8)].

Le type le plus dysplasique de Dejour (type 3) est presque exclusivement rencontré dans les luxations récidivantes. Les dysplasies des témoins et des SDR sont surtout des types 1 et 2. Cette classification a donc une valeur à la fois quantitative et qualitative, bien que non absolue. Ces dysplasies trochléennes dans nos études se sont révélées moins significatives que les anomalies positionnelles de la rotule, mais constituent de toute évidence un fait fondamental et une des clés de la compréhension des problèmes fémoro-patellaires. Il existe un syndrome dysmorphique fémoro-patellaire, qui prédispose aux luxations de rotule. Il associe dans sa forme la plus achevée (*fig. 1*) :

- une patella alta, avec une rotule en face de la diaphyse fémorale en extension, et non en face de la fossette sus-trochléenne de la métaphyse ;

- une forte subluxation externe de la rotule, bien démontrée par le cliché de profil où, dans le stade 4 que nous avons décrit [Dupont (8)], la rotule se trouve être vue de face ou presque ;

- une dysplasie de la trochlée, plate, et même convexe dans sa partie proximale, celle contre laquelle s'engage la rotule en flexion. Cette anomalie se caractérise à la fois par une absence d'antéposition par rapport à la corticale antérieure de la diaphyse, et une insuffisance de développement proximal ;

- une saillie de la métaphyse dans le prolongement du cartilage de croissance métaphysaire, réalisant la barre métaphysaire également bien visible au scanner ;

- une dysplasie de la rotule, type Wiberg 3 (11) ou en bérêt de chasseur alpin, avec facette articulaire unique externe et facette interne verticale et non articulaire sur l'incidence axiale. Le problème de l'origine de ces anomalies morphologiques n'a curieusement pas été soulevé dans la littérature orthopédique, qui s'est contentée d'en faire la description, et d'en évaluer la responsabilité clinique. Deux hypothèses peuvent être envisagées : une d'origine génétique, et/ou une d'origine épigénétique, où la dysplasie serait liée aux contraintes subies par l'articulation fémoro-patellaire au cours de la croissance.

S'interroger sur l'étiologie des dysplasies trochléennes c'est donc rechercher leur origine dans trois directions :

1) Le domaine de l'anatomie comparée : elle montre le lien étroit qui existe entre forme et fonction dans cette articulation au sein des divers groupes zoologiques, en relation avec leur mode de locomotion. Elle permet ainsi de resituer la morphologie humaine dans un contexte plus large et de comprendre comment elle n'est qu'un exemple parmi d'autres d'adaptation à une fonction particulière ici imposée par la bipédie.

2) Le domaine de la phylogenèse, i.e. de l'évolution de cette articulation. La morphologie de l'articulation



FIG. 1. — Radiographie de profil en extension, condyles superposés, dans une luxation récidivante de rotule : patella alta, dysplasie trochléenne type 3 de Dejour, subluxation externe de la rotule stade 4 (modification personnelle) de Maldague, barre métaphysaire et hypertorsion externe du tibia : le syndrome malformatif est au complet, à l'exception de la dysplasie rotulienne, visible sur l'axiale seule.

fémoro-patellaire de l'homme actuel est le résultat d'une longue évolution. La période la plus pertinente qui nous intéresse ici est récente : c'est celle qui a affecté la lignée de nos ancêtres directs, bien documentée grâce à des fossiles remontant à 3 millions d'années. Ces premiers hominidés qui commençaient à pratiquer la bipédie, les australopithèques, sont bien connus du grand public grâce à la notoriété de la célèbre « Lucy ». La variabilité de notre morphologie fémoro-patellaire s'explique en partie par celle dont elle est immédiatement issue.

3) Le domaine de l'ontogenèse, c'est-à-dire du développement de l'individu, du fœtus à l'âge adulte. Les caractères propres de l'articulation fémoro-patellaire humaine sont-ils déjà présents sur l'épiphyse cartilagineuse fœtale ? La mise en charge du squelette au cours de la croissance postnatale modifie-t-elle ces caractères ? Nous verrons de quelle façon les modifications angulaires subies par le fémur au cours de l'apprentissage de la marche sont liées à l'évolution de la morphologie de la trochlée.

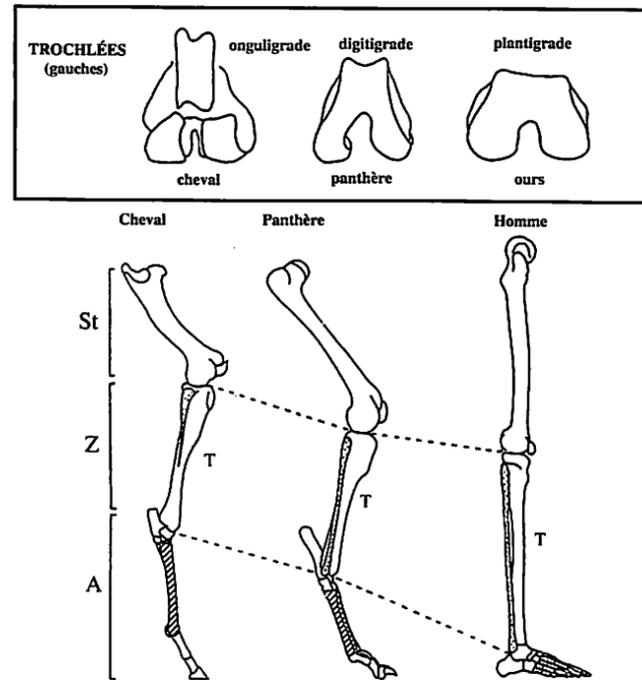


FIG. 2. — En haut : épiphyse distale du fémur gauche d'un cheval, d'une panthère et d'un ours. En bas : membre inférieur d'un mammifère onguligrade (cheval), digitigrade (panthère) et plantigrade (homme). St. : stylo-pode, Z. : zeugopode, A. : autopode, T. : tibia.

#### ANATOMIE COMPARÉE : MISE EN ÉVIDENCE DU LIEN ENTRE FORME ET FONCTION DANS L'ARTICULATION FÉMORO-PATELLAIRE DES MAMMIFÈRES

L'anatomie comparée montre les grandes variations morphologiques de l'articulation du genou qui existent dans le règne animal. Nous nous limitons ici à l'anatomie comparée des mammifères. Notre étude est fondée sur l'analyse morpho-fonctionnelle comparée de squelettes de mammifères adultes, appartenant aux collections ostéologiques du Laboratoire d'Anatomie Comparée du Muséum National d'Histoire Naturelle. Nous étudierons surtout le groupe des primates, auquel l'homme appartient et qui présente des modes de locomotion très variés. L'homme est en effet le seul d'entre eux à avoir adopté la bipédie comme mode de locomotion unique. Au sein des primates, nous nous intéresserons plus particulièrement à la comparaison entre l'homme et les grands singes (chimpanzé, gorille, orang-outang) puisqu'ils sont nos plus proches parents dans la nature actuelle.

#### Variation de l'épiphyse distale du fémur chez les mammifères onguligrades, digitigrades et plantigrades [Tardieu (12)]

Chez les mammifères tous les constituants de l'articulation du genou sont présents : ménisques, ligaments croi-

sés et latéraux, appareil extenseur. L'articulation fémoro-patellaire est très variable en fonction des modes locomoteurs pratiqués. Ces différences morpho-fonctionnelles sont particulièrement marquées lorsque l'on étudie cette articulation chez les mammifères onguligrades, digitigrades et plantigrades (fig. 2). On observe un gradient dans le creusement de la trochlée fémorale : chez les mammifères plantigrades, comme l'ours, la trochlée est plate, large et sans rebord. Chez les mammifères digitigrades, comme la panthère, elle est plus étroite, plus creusée et ses deux bords sont légèrement saillants. Chez les mammifères onguligrades, comme le cheval, elle est étroite, creusée d'un sillon profond entre deux lèvres saillantes qui forment presque des bourrelets. Plus le membre inférieur est adapté à la course, comme chez les onguligrades, plus les mouvements deviennent exclusivement parasagittaux. Au niveau du genou, seuls des mouvements purs de flexion-extension sont autorisés. Tout mouvement de rotation est éliminé. La rotule se trouve engagée entre les lèvres saillantes de la trochlée et son mouvement de glissement, qui peut être très rapide, est strictement guidé.

Dans le type onguligrade, la surface articulaire trochléenne est totalement séparée des surfaces condyliennes. En effet, dressé sur ses quatre pattes, l'animal a le genou toujours placé en légère flexion. Un dispositif ligamentaire bloque la rotule au-dessus de la lèvre interne de la trochlée et permet donc une station prolongée en flexion légère, sans mettre en jeu aucune énergie musculaire. Dans les types digitigrade et plantigrade, on observe une continuité entre les surfaces articulaires trochléennes et condyliennes. La rotule peut donc, dans le mouvement de flexion, dépasser la trochlée et venir glisser le long de l'échancrure intercondylienne. Le tibia peut, lorsque la flexion diminue, remonter beaucoup plus en avant sur les condyles : l'extension complète est alors possible. Cette zone de transition articulaire est légèrement resserrée chez les digitigrades. Elle est élargie au contraire chez les plantigrades, comme l'ours qui adopte occasionnellement la position bipède. Celui-ci garde toutefois un certain degré de flexion lors de cette station érigée, et n'étend pas totalement son articulation du genou. Chez tous les primates actuels, on observe une continuité des surfaces articulaires trochléennes et condyliennes. Parmi les primates, on observe divers modes d'appui, de la digitigradie à la plantigradie, la majorité d'entre eux pratiquant une locomotion semi-digitigrade, souvent variable pour un même individu avec la vitesse du déplacement.

#### Variation de l'épiphyse distale fémorale chez les primates [Tardieu (12, 13)]

Les primates pratiquent des modes de locomotion très variés. Ils sont à la fois arboricoles et terrestres. Au sol, ils sont le plus souvent quadrupèdes. Ils peuvent être aussi occasionnellement bipèdes. Dans les arbres, certains sont

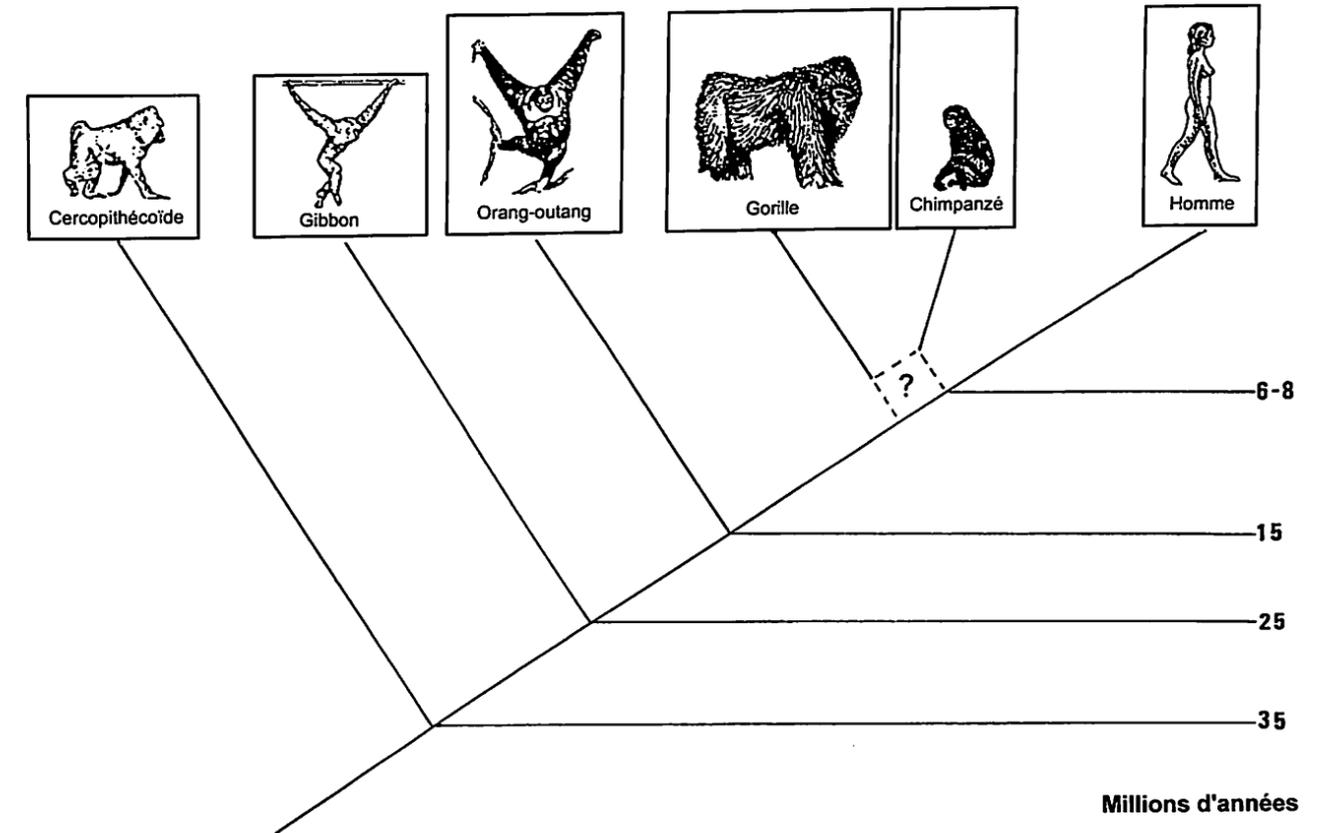


FIG. 3. — Schéma évolutif de l'homme et des grands primates non humains. Les dates de séparation des divers rameaux sont inévitablement approximatives. Les australopithèques, ancêtres de l'homme, sont connus en Afrique de 4 à 1 million d'années environ. Les fémurs fossiles cités dans cet article datent de 3 millions d'années pour le genre *Australopithecus* et de 1,8 million d'années pour le genre *Homo*.

des sauteurs agiles, d'autres des grimpeurs lents, d'autres se déplacent en se suspendant aux branches par les bras. Leur morphologie fémoro-patellaire est adaptée à ces différentes fonctions et présente donc des caractères qui la différencient de notre genou de bipède. Poids, mode de déambulation et vitesse de déplacement influent sur la morphologie de la fémoro-patellaire. Plus le déplacement est rapide, le poids léger, et le primate sauteur, plus les surfaces articulaires sont étroites, allongées et creusées, la rotule se trouvant enclenchée et guidée dans la trochlée. Plus la déambulation est lente, le poids élevé, et le primate grimpeur, plus la rotule comme la trochlée est large et plate [Vallois (14)]. Nous présentons une comparaison détaillée de l'articulation du genou chez l'homme et chez deux autres familles de primates, les cercopithécidés et les grands singes, car chacune de ces trois familles présente une morphologie différente très spécialisée. Les cercopithèques sont des petits quadrupèdes généralisés arboricoles et terrestres. Les grands singes, nos plus proches parents dans la nature actuelle, sont des grimpeurs arboricoles. Ils pratiquent au sol une locomotion quadrupède

particulière où les mains sont en appui sur les deuxième phalanges (« knuckle walking ») et ils sont occasionnellement bipèdes. Ils n'étendent le genou qu'en position quadrupède, jamais en position bipède. L'homme est le seul primate devenu exclusivement bipède. Il est aussi le seul à pratiquer l'extension totale sur un genou en charge. Les grands singes (chimpanzé, gorille, orang-outang) sont issus d'une lignée commune avec celle de l'homme. Notre lignée s'est éloignée de la leur en raison de son adaptation en Afrique de l'Est à un environnement de savane, il y a plus de 5 millions d'années. Le chimpanzé est notre plus proche parent, le gorille est plus éloigné, l'orang-outang puis le gibbon ont divergé plus tôt encore (fig. 3).

Cette étude comparative est fondée sur l'ostéologie du fémur. Quatre caractères morphologiques du fémur se sont révélés essentiels à la compréhension de son anatomie fonctionnelle, en lien avec la bipédie : 1) l'obliquité de la diaphyse fémorale par rapport au plan infracondylaire (fig. 4 et 5) ; 2) le relief de la trochlée fémorale, notamment la surélévation de sa lèvre externe, propre à l'homme (l'absence de ce relief est une des caractéristiques des

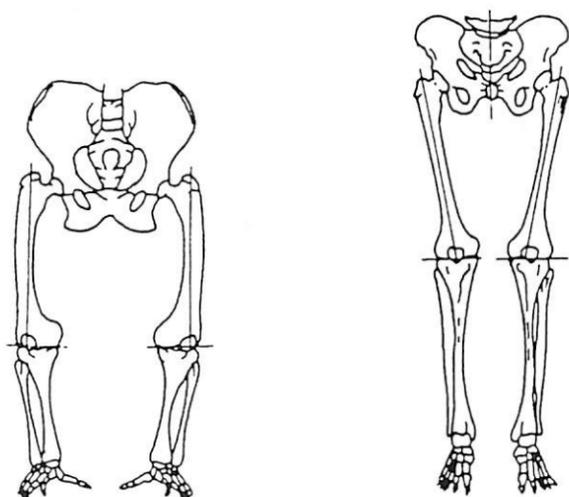


FIG. 4. — Vue antérieure du bassin et du fémur d'un gorille (à gauche) et d'un homme (à droite).

dysplasies trochléennes) ; 3) le profil latéral du condyle externe ; 4) la forme de l'épiphyse dans le plan horizontal.

#### Obliquité de la diaphyse fémorale par rapport à la verticale

Le fémur des cercopithécidés et des grands singes est droit (fig. 5). La forte obliquité du fémur chez l'homme par rapport au plan infracondylo-

diaphysaire ou bicondyloire ou angle de valgus du fémur) a été mesurée dans de nombreuses populations humaines [Parsons (15), Pearson et Bell (16), Walmsley (17)] dont les moyennes se situent de 8° à 11°. Cet angle permet à l'articulation du genou de se placer dans une position interne par rapport à l'articulation de la hanche et à se rapprocher de la ligne de gravité du corps. Ceci permet au genou et à la cheville d'être placés presque directement sous le centre de gravité du corps pendant les phases d'appui unipodal de la marche. A l'inverse, les primates non humains, lorsqu'ils adoptent la marche bipède, se déplacent avec les genoux en position écartée.

#### Relief de la trochlée fémorale

Elle est symétrique et très peu creusée chez les cercopithécidés. Elle est symétrique, plate et peu creusée chez les grands singes, dont la rotule ne présente qu'une seule facette (fig. 6a). Elle présente un sillon profond et une lèvre latérale plus haute et plus saillante antérieurement que la lèvre médiale chez l'homme. Ce caractère, chez ce dernier, est étroitement lié à l'angle d'obliquité externe du fémur. Il permet en effet le maintien de la stabilité médio-latérale de la rotule, lors des premiers degrés de flexion du genou, en présence d'un valgus fémoral important qui, imprimant une direction oblique au quadriceps, tendrait à la luxer en dehors. Le creux sustrochléen ne s'observe que chez l'homme, ainsi que la rainure condylo-trochléenne, marquant l'empreinte antérieure des ménisques sur les condyles dans le mouvement de rotation automatique terminal. Les radiographies de profil de la trochlée de chim-

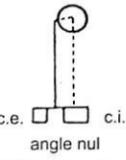
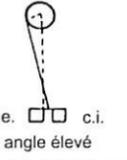
Caractères	Cercopithèques	Grands singes	Homme
Obliquité de la diaphyse fémorale	angle d'obliquité nul	 c.e. c.i. angle nul	 c.e. c.i. angle élevé
Relief de la trochlée fémorale			
Profil latéral du condyle externe			
Proportions de l'épiphyse distale			
Symétrie de l'épiphyse par rapport au plan sagittal passant par le milieu de la trochlée			

FIG. 5. — Tableau présentant schématiquement les caractères distinguant la diaphyse et l'épiphyse distale (côté droit) du fémur de différents primates : les cercopithèques, les grands singes et l'homme (c.i. : condyle interne, c.e. : condyle externe).

panzés, gorilles ou d'orangs-outangs montrent un aspect quasi identique à celui des trochlées humaines les plus dysplasiques (fig. 6b).

#### Profil du condyle externe

Circulaire chez les cercopithécidés et les grands singes, il est elliptique chez l'homme. En termes fonctionnels, ce contour elliptique correspond à une augmentation du rayon de courbure du condyle externe dans sa partie inférieure. Ce rayon de courbure est accru et maximum précisément dans la zone de contact fémoro-tibial correspondant à l'extension de l'articulation. Cette augmentation du rayon de courbure minimiserait la pression qui s'exerce sur le genou, de façon préférentielle lorsque celui-ci est proche de l'extension ou en extension complète [Heiple et Lovejoy (18), Lovejoy *et al.* (19)]. A l'opposé, tous les autres primates présentent une projection circulaire des condyles, qui ne favorise aucunement la position d'extension complète de l'articulation.

#### Proportions de l'épiphyse distale

Chez les grands singes, on observe un élargissement médio-latéral de l'épiphyse, alors que chez l'homme on observe un allongement antéro-postérieur de celle-ci. L'épiphyse des grands singes est très asymétrique par rapport au plan parasagittal passant par le milieu de la trochlée, avec une forte prépondérance du condyle interne sur le condyle externe (fig. 6a) : la longueur développée et la largeur du condyle interne sont très supérieures. L'épiphyse humaine présente une légère asymétrie par rapport à ce même plan, due à l'infléchissement en forme d'arc de cercle du segment antérieur du condyle interne. L'échancre intercondyloire est plus haute que large, alors que c'est l'inverse chez les grands singes.

#### LES ARGUMENTS DE L'ONTOGENÈSE FÉMORALE CHEZ L'HOMME ACTUEL ET DE LA PHYLOGENÈSE CHEZ LES HOMINIDÉS

##### Un paramètre clé : le remodelage angulaire de la diaphyse

##### Croissance de l'angle d'obliquité fémorale chez l'enfant

Les radiographies des fémurs des nouveau-nés montrent que le plan physaire qui sépare l'épiphyse distale encore cartilagineuse de la diaphyse est horizontal, que la diaphyse fémorale est perpendiculaire à ce plan, c'est-à-dire verticale, et que l'angle d'obliquité est nul (fig. 7). Sur les pièces ostéologiques (fig. 8) présentant uniquement les diaphyses d'un fœtus de 7 mois (0°) et de quatre enfants de 6 mois (2°), de 3 ans (5°), de 5 ans (9°) et de 7 ans (9°), on observe que l'angle d'obliquité se forme sur la diaphyse, indépendamment de la croissance de l'épiphyse distale du fémur. L'obliquité est donc chez l'homme un phénomène

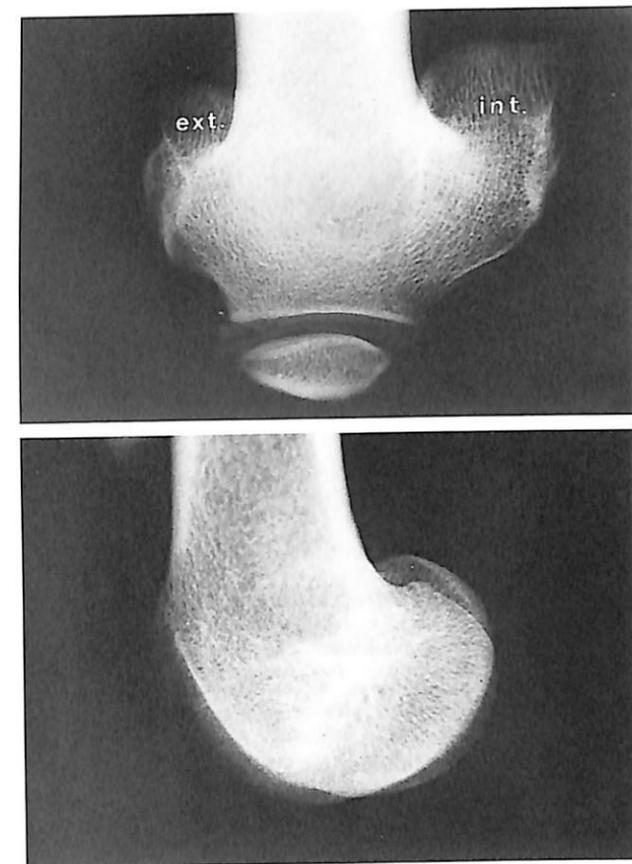


FIG. 6. — Radiographies de l'épiphyse fémorale distale d'un gorille adulte. a) Incidence axiale avec la rotule en place. La trochlée est plate et symétrique, comme la rotule. Absence de lèvre externe sur la trochlée. b) Vue de profil : aspect étonnement similaire à celui d'une dysplasie chez l'homme.

diaphysaire dont la référence est le plan physaire, situé à l'extrémité distale de la diaphyse.

Cet angle se forme grâce à une apposition métaphysaire plus forte du côté interne du cartilage de croissance, à l'extrémité distale de la diaphyse, en lien avec la pression plus élevée qui s'y applique [Pauwels (20)], lorsque l'enfant, apprenant à marcher, passe d'une charge en varus à une charge en valgus du membre inférieur [Salenius et Vankka (21)]. Les variations extrêmes de cet angle mesuré sur différentes populations d'adultes s'étendent de 6° à 14°, et les moyennes des différentes populations se situent entre 8° et 11°. Le dimorphisme sexuel peut être, suivant les populations concernées, non significatif ou significatif, l'angle étant dans ce cas plus élevé chez la femme (14 à 16°). L'accroissement de l'angle bicondyloire se produit surtout au cours des premières années de l'enfance entre un an et quatre ans, ce qui correspond à l'âge de l'apprentissage de la station debout puis de la marche [Tardieu (22), Tardieu et Trinkaus (23), Tardieu et Damsin (24)].

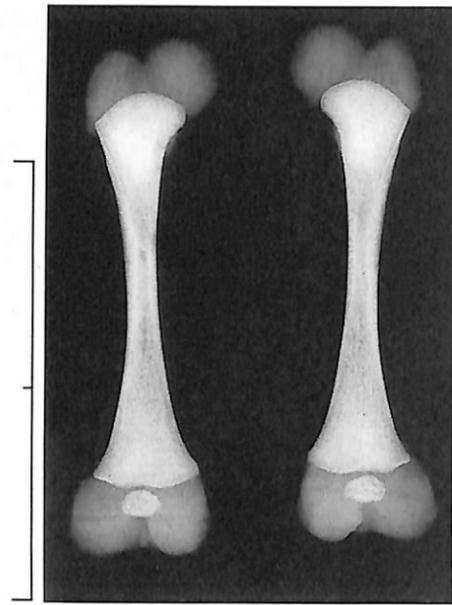


FIG. 7. — Radiographie des fémurs d'un nouveau-né, avec visibilité des cartilages épiphysaires (échelle : 10 cm, voir figure 8 n° 4).

Il résulte de l'apparition de cet angle d'obliquité externe du fémur au cours de l'apprentissage de la bipédie chez l'enfant la mise en valgus progressive de l'appareil extenseur, donc une tendance à la subluxation externe de la rotule. A l'aide de radiographies des membres inférieurs d'enfants non marchants (J.-P. Damsin, G. Duval Beaupère et H. Taussig), nous avons montré que cet angle ne se

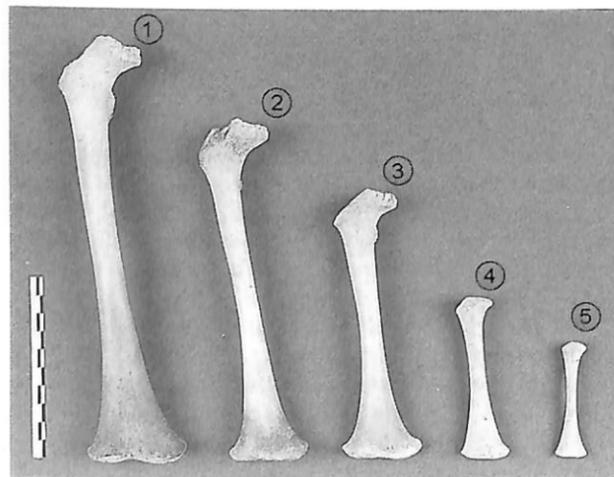


FIG. 8. — Vue antérieure des diaphyses fémorales d'un fœtus de 7 mois (n° 5) et de quatre enfants de 6 mois (n° 4), 3 ans (n° 3), 5 ans (n° 2) et 7 ans (n° 1). Noter l'accroissement de l'angle d'obliquité du fémur avec l'âge, de 0° chez le fœtus à 2°, 5°, 9° et 9° respectivement (échelle : 10 cm).

forme pas chez des enfants non marchants [Tardieu et Damsin (24)], établissant ainsi fermement le caractère fonctionnel épigénétique (acquis) de la formation de cet angle.

La saillie de la lèvre externe de la trochlée et le sillon trochléen, facteurs de stabilité rotulienne, sont-ils des caractères également épigénétiques ou existent-ils avant l'apparition de l'obliquité fémorale ?

#### Evolution diaphysaire chez les hominidés fossiles

La présence de cet angle d'obliquité sur tous les fémurs des hominidés datant de 3 millions d'années (*Australopithecus afarensis*, nom savant de Lucy) a permis de les diagnostiquer comme bipèdes [Lovejoy *et al.* (25), Tardieu et Preuschoft (26)]. Cet angle est donc un caractère fonctionnel ancien, apparu vers cette époque.

#### Les modifications épiphysaires

##### Croissance de l'épiphyse distale osseuse chez les enfants de 10 à 18 ans

Au cours de la période infantile, puis juvénile, l'épiphyse distale s'ossifie progressivement. A dix ans environ, la largeur de l'épiphyse osseuse a atteint celle de la diaphyse. A partir de la préparation des fémurs issus des collections ostéologiques infantiles appartenant au Laboratoire d'Anthropologie du Musée de l'Homme, nous avons constitué une série de croissance des épiphyses distales osseuses d'enfants de 8 à 18 ans. Cette série a permis de montrer qu'à 11-12 ans, l'épiphyse osseuse présente une forme rectangulaire, la trochlée est symétrique et dépourvue de saillie de la lèvre externe, le condyle externe est presque circulaire. Au cours de l'adolescence, l'épiphyse subit un fort allongement antéro-postérieur, la lèvre externe de la trochlée s'élève, créant un sillon en son milieu, le condyle externe accuse un profil de plus en plus elliptique (fig. 9). Cette évolution osseuse ignore le revêtement cartilagineux. Le diagnostic d'une dysplasie trochléenne sur le cliché de profil du genou selon les critères de Dejour est d'ailleurs difficile avant la fin de la croissance osseuse chez l'enfant, surtout avant 10 ans.

##### Evolution de l'articulation fémoro-patellaire chez les hominidés fossiles

A 3 millions d'années, le fémur des premiers hominidés fossiles (*Australopithecus afarensis*) bien qu'il présente déjà un angle d'obliquité fémorale élevé, possède une épiphyse qui, à l'état adulte, est encore primitive : forme épiphysaire rectangulaire, trochlée large et très peu creusée, faible saillie de la lèvre externe et profil faiblement elliptique du condyle externe. L'épiphyse du fémur de « Lucy » montre la morphologie du fémur d'un enfant de 10 ans, dont l'épiphyse serait déjà soudée [Tardieu (27)]. A 1,8 millions d'années, sur les fémurs fossiles appartenant

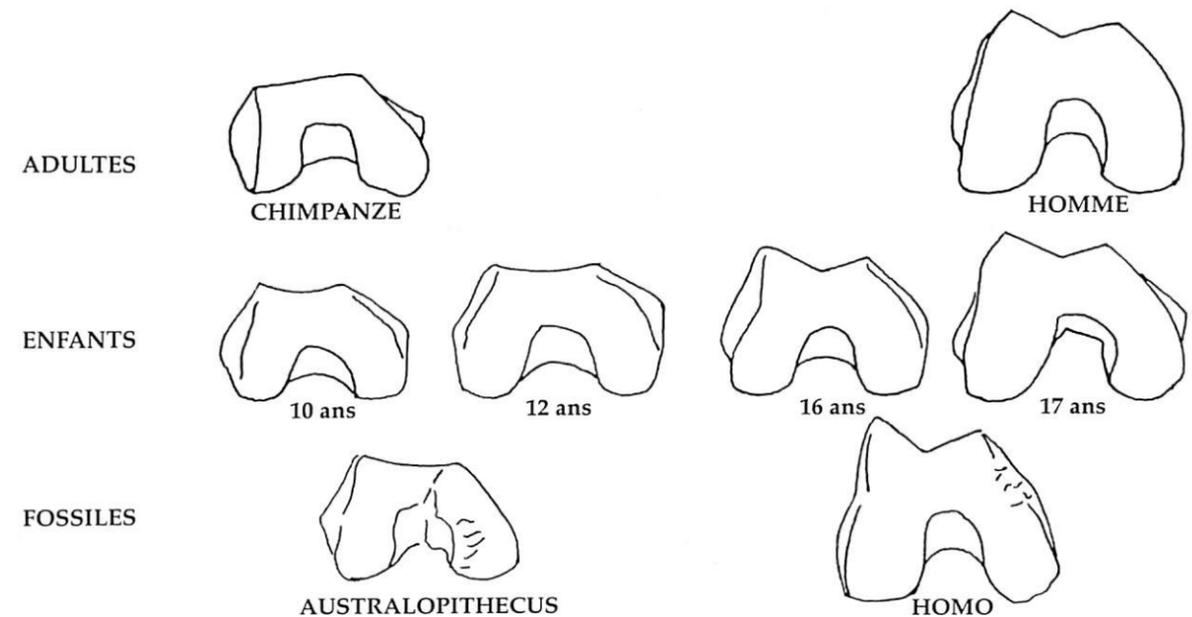


FIG. 9. — (Echelle : 4 cm) En haut : Vues inférieures de l'épiphyse droite d'un chimpanzé et d'un homme adultes. Au milieu : Développement de l'épiphyse osseuse durant l'enfance et l'adolescence chez l'homme. De gauche à droite : épiphyses droites d'enfants de 10, 12, 16 et 17 ans. En bas : Séquence évolutive des fossiles hominidés (tous adultes), parallèle à la séquence ontogénétique des enfants : A gauche, un spécimen d'*Australopithecus* (3 millions d'années), à droite, un spécimen d'*Homo* (1,8 million d'années).

au genre *Homo* qui montrent un angle d'obliquité élevé, les épiphyses distales présentent désormais l'état dérivé (moderne) des trois caractères précités : épiphyse carrée, trochlée creusée d'un sillon profond, forte saillie de la lèvre externe et profil très elliptique du condyle externe. Dans ce cas particulier, on observe que l'ontogenèse (développement individuel) récapitule la phylogenèse (histoire évolutive) (fig. 9). Ce changement de forme tardif des épiphyses dans l'évolution des hominidés est lié à la croissance lente des épiphyses par rapport à celle des diaphyses dans le développement individuel [Pous (28)].

Dans la variabilité de la trochlée humaine, il faut donc considérer la forte saillie de la lèvre externe comme un caractère dérivé (progressif). Il est le plus fréquent et correspond à ce que les anatomistes présentent comme étant la morphologie normale. Une trochlée plate correspond à un caractère régressif et même atavique, moins fréquent. L'amplitude de la variabilité humaine correspond à celle que l'on observe dans toute espèce de primates ou de mammifères. Notons que nous n'avons pas observé de corrélation directe entre le degré d'obliquité et le degré de saillie de la lèvre externe. Ces deux caractères, à l'évidence liés fonctionnellement à l'origine, ne se développent pas suivant le même processus ontogénétique.

##### Morphologie de l'ébauche cartilagineuse fœtale et néonatale

Dans une étude préliminaire de 20 fœtus humains et de 10 fœtus de chimpanzé (pièces formolées appartenant aux

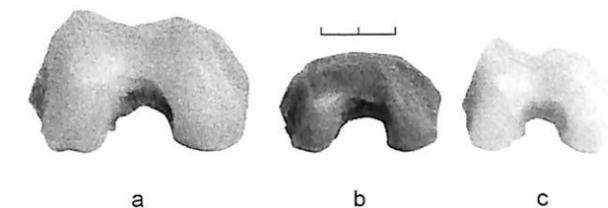


FIG. 10. — Vues inférieures des épiphyses cartilagineuses droites. a) Nouveau-né humain. b) Nouveau-né mâle chimpanzé. c) Fœtus humain féminin de 29 semaines et demie (échelle : 1 cm).

collections du Laboratoire d'Anatomie Comparée du M.N.H.N.) portant sur la morphologie de l'épiphyse cartilagineuse du fœtus et du nouveau-né, nous avons montré [Tardieu (29)] que chez le chimpanzé la trochlée est déjà plate et que chez l'homme, la saillie de la lèvre externe est déjà présente très précocement (fig. 10), comme Walmsley (30) l'avait déjà montré chez l'homme. La variabilité fœtale et néonatale, que nous n'avons pu observer que sur 20 spécimens à l'heure actuelle, montre que la lèvre externe de la trochlée peut être faiblement saillante, ou fortement saillante.

La saillie de la lèvre externe de la trochlée est un caractère qui a été d'abord « acquis » de façon mécanique au cours de la vie postnatale des hominidés en réponse à la

présence de l'angle d'obliquité fémorale imposé par la bipédie. Cette saillie s'oppose aux contraintes luxantes qui s'exercent sur la rotule du fait de l'obliquité de l'appareil extenseur, en particulier lors de l'engagement rotulien face à la trochlée dans les premiers degrés de flexion. Ce caractère a été sélectionné et « assimilé » génétiquement entre 3 et 1,8 millions d'années [Tardieu (29)]. C'est pourquoi il apparaît dès le stade fœtal. L'assimilation génétique [Waddington (31)] est le processus par lequel un caractère phénotypique apparu en réponse à une influence environnementale est pris en charge par le génotype, à travers un processus de sélection naturelle, de telle sorte que le caractère se forme même en l'absence du stimulus externe qui était nécessaire au départ. La transmission n'est pas individuelle comme dans l'ancienne conception lamarckienne erronée. Elle repose sur la sélection naturelle darwinienne et la génétique des populations.

Une équipe australienne a récemment contribué à mettre au jour certains des mécanismes qui la gèrent [Morgan *et al.* (32), John et Surani (33)]. Bien que dans l'état actuel des connaissances, la génétique soit encore loin d'être capable de rendre compte de ces mécanismes, des progrès dans ce sens ont été réalisés par cette équipe. Leur recherche sur le locus « agouti » de la souris montre comment une modification épigénétique, affectant le génome maternel et due à l'activité d'un rétrotransposon est transmise de la mère au rejeton par la lignée germinale femelle. Ces avancées notables ne doivent pas masquer les étapes qui restent à franchir.

#### CONCLUSION

Retenons de l'évolution du fémur et du genou de nos ancêtres immédiats le rôle premier joué par la formation fonctionnelle épigénétique de l'angle d'obliquité fémorale, caractère initiateur des modifications subies ensuite par l'articulation fémoro-patellaire. Si ce caractère « leader » n'a jamais été inscrit dans le génome depuis 3 millions d'années, en revanche sillons trochléens et saillie de la berge externe de la trochlée ont, eux, été des caractères d'abord « acquis », puis « assimilés génétiquement ». Il est donc sûr que facteurs génétiques et épigénétiques interviennent dans la morphogenèse de la trochlée fémorale et de la rotule et donc dans leur variabilité morphologique. C'est l'étude de ces interactions complexes qui pourraient permettre de mieux comprendre la genèse des morphotypes prédisposant à la luxation rotulienne ou au syndrome douloureux rotulien. L'existence de formes congénitales familiales de luxations récidivantes ou permanentes de la rotule, avec dysplasie trochléenne majeure [Rouvillain *et al.* (34)], la fréquence des luxations récidivantes de rotule avec dysplasie de la trochlée dans les maladies chromosomiques comme la trisomie 21, plaident en faveur d'une origine génétique. La porte est ouverte vers de nouvelles recherches sur le développement fœtal et le génome humain.

La mise en cause d'une rétraction du quadriceps entraînant une patella alta puis une dysplasie trochléenne secondaire plaiderait, elle, pour une origine épigénétique. Cette opinion est partagée par de nombreux auteurs. Garin et Kohler (35) donnent l'exemple d'un enfant opéré à 5 ans d'une luxation permanente de la rotule avec trochlée convexe et chez qui le recentrage chirurgical de la rotule s'est accompagné secondairement d'un creusement de la trochlée. Il serait toutefois hasardeux d'en tirer des conclusions agressives quant au traitement préventif des dysplasies trochléennes chez l'enfant, sauf cas exceptionnels.

Le passage de l'épiphyse cartilagineuse du nouveau-né à l'épiphyse osseuse de l'adulte est encore mal documenté, considérant l'absence de connaissance précise de l'évolution de la forme et de l'épaisseur du revêtement cartilagineux de la trochlée et de la rotule pendant la croissance. Des études transversales ont montré qu'au cours de celle-ci, l'épaisseur cartilagineuse est plus forte sur la berge interne que sur la berge externe de la trochlée [Nietosvaara (36)] ce qui est conforme à nos études sur la croissance de l'épiphyse osseuse. L'épaisseur cartilagineuse et l'angle d'ouverture trochléen n'ont jamais été mesurés sur des séries longitudinales. Elles seules pourraient nous montrer dans quelle mesure l'angle trochléen cartilagineux est modifié par les contraintes mécaniques qui s'y exercent au cours de la croissance. La reconstruction tridimensionnelle à partir d'images en résonance magnétique de genoux d'enfants, que nous projetons en collaboration avec numériciens et mécaniciens, devrait permettre de combler nos lacunes. La connaissance de la croissance normale de la chondroépiphyse nous permettra de comparer l'évolution des morphologies dysplasiques en termes de croissance du complexe os/cartilage.

Pour clore, précisons que la verticalisation progressive de la lignée ayant abouti à l'homme s'est accompagnée de nombreux avantages évolutifs. Le développement du cerveau, la spécialisation de la main, puis le dialogue main/cerveau sont les plus remarquables et ont permis d'acquies manipulation d'outils, pensée et langage. Comme la colonne vertébrale, le bassin et les autres articulations du membre inférieur, le genou a dû s'adapter à cette fonction nouvelle : la bipédie. Il en résulte une articulation fémoro-patellaire unique, remarquable par le fait qu'en position de fonction, en extension complète, n'existe aucun contact entre les surfaces articulaires. Luxations de rotule et douleurs fémoro-patellaires semblent être le prix à payer pour bien d'autres avantages.

#### Références

1. ALBEE FH : The bone graft wedge in the treatment of habitual dislocation of the patella. *Med Red*, 1915, 88, 367-370.
2. BRATTSTRÖM H : Shape of the intercondylar groove normally and in recurrent dislocation of the patella. A clinical and X-ray anatomical investigation. *Acta Orthop Scand*, 1964, 68, suppl. II, 53-78.

3. BRATTSTRÖM H : Patella alta in non-dislocating knee joints. *Acta Orthop Scand*, 1970, 41, 578-588.
4. GOLDTHWAIT JE : Slipping or recurrent dislocation of the patella. *Boston Med Surg J*, 1904, 150, 169-174.
5. DEJOUR H, WALCH G, NEYRET P, ADELAINE P : La dysplasie de la trochlée fémorale. *Rev Chir Orthop*, 1990, 76, 45-54.
6. GOUTALLIER D : Pathologie fémoro-patellaire, Conférence d'enseignement de la SOFCOT, *Exp Scient Fr*, Paris, 1996.
7. DUPONT JY : Subluxation rotulienne : où en sommes nous en 1995 ? *Acta Orthop Belgica*, 1995, 61, 155-168.
8. DUPONT JY : Pathologie douloureuse fémoro-patellaire. Analyse et classification. In Saillant G : *Le Genou du Sportif*. *Exp Scient Fr*, Paris, 1997, 12, 163-176.
9. DUPONT JY : Performances comparées de trois techniques radiologiques dans le dépistage des subluxations rotuliennes. *Ann Orthop Ouest*, 1998, 30, 55-60.
10. MALDAGUE B, MALGHEM J : Apport du cliché de profil du genou dans le dépistage des instabilités rotuliennes. *Rev Chir Orthop*, 1985, 71, suppl. II, 5-13.
11. WIBERG G : Roentgenographic and anatomic studies on the patellofemoral joint. *Acta Orthop Scand*, 1941, 319-409.
12. TARDIEU C : L'articulation du genou chez les Primates. *Cahiers de Paléanthropologie*, Presses du C.N.R.S., Paris, 1983, 108 p.
13. TARDIEU C : L'angle bicondylaire du fémur est-il homologue chez l'homme et les primates non humains ? Réponse ontogénétique. *Bull Mem Soc Anthropol Paris*, 1993, 5, 159-168.
14. VALLOIS H : La valeur morphologique de la rotule chez les mammifères. *Bull Mem Soc Anthropol Paris*, 1919, 78, 1-31.
15. PARSONS FG : The characters of the English thigh bone. *J Anat Physiol*, 1914, 48, 238-267.
16. PEARSON K, BELL J : A study of the long bones of the English skeleton. *Drapers' Company Memoirs Biometric*, Series XI. Cambridge, Cambridge University Press, 1919.
17. WALMSLEY T : The vertical axes of the femur. *J Anat*, 1933, 67, 284-300.
18. HEIPLE KG, LOVEJOY CO : The distal femoral anatomy of *Australopithecus*. *Am J Phys Anthropol*, 1971, 35, 75-84.
19. LOVEJOY CO, HEIPLE KJ, BURSTEIN AH : The gait of *Australopithecus*. *Am J Phys Anthropol*, 1973, 38, 757-780.
20. PAUWELS F : *Biomécanique de l'appareil locomoteur*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1979.
21. SALENIUS P, VANKKA E : The development of the tibiofemoral angle in children. *J Bone Joint Surg*, 1975, 57-A, 259-261.
22. TARDIEU C : Morphogenèse de la diaphyse fémorale chez l'homme. Signification fonctionnelle et évolutive. *Folia Primatol*, 1994, 63, 53-58.
23. TARDIEU C, TRINKAUS E : The early ontogeny of the human femoral bicondylar angle. *Am J Phys Anthropol*, 1994, 95, 183-195.
24. TARDIEU C, DAMSIN JP : Evolution of the angle of obliquity of the femoral diaphysis during growth. Correlations. *Surg Radiol Anat*, 1997, 19, 91-97.
25. LOVEJOY CO, JOHANSON DC, COPPENS Y : Hominid lower limb bones recovered from the Hadar Formation : 1974-1977 collections. *Am J Phys Anthropol*, 1982, 57, 679-700.
26. 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*, 1996, 66, 68-81.
27. TARDIEU C : Femur ontogeny in humans and great apes : heterochronic implications for hominid evolution. *C R Acad Sci*, 1997, 125, 899-904.
28. POUS JG : Le cartilage de croissance. Conférences d'enseignement de la SOFCOT, *Exp Scient Fr*, Paris, 1982, 41-54.
29. 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, 365-377.
30. WALMSLEY T : Development of the patella. *J Anat*, 1940, 74, 360-368.
31. WADDINGTON CH : Canalization of development and genetic assimilation of acquired characters. *Nature*, 1959, 183, 1654-1656.
32. MORGAN HD, SUTHERLAND GE, MARTIN LK, WHITELAW E : Epigenetic inheritance at the agouti locus in the mouse. *Nature Genetics*, 1999, 23, 314-318.
33. JOHN MR, SURANI MA : Agouti germ line gets acquisitive. *Nature Genetics*, 1999, 23, 254-256.
34. ROUVILLAIN JL, PIQUION N, LEPAGE-LEZIN A, GARSAUD AM, COUETTE P, DELATTRE O, CATONNÉ Y : Une forme familiale de luxation récidivante bilatérale de la rotule avec dysplasie trochléenne majeure. *Rev Chir Orthop*, 1988, 84, 285-291.
35. GARIN C, KOHLER R : L'instabilité rotulienne chez l'enfant. Conférences d'enseignement de la SOFCOT, *Exp Scient Fr*, Paris, 1995, 52, 203-217.
36. NIETOSVAARA Y : The femoral sulcus in children : an ultrasonographic study. *J Bone Joint Surg*, 1994, 76B, 807-809.