
Chapitre 4. LES AXES ARTICULAIRES

« *Donnez-moi un point d'appui et je soulèverai le monde.* » ARCHIMÈDE

4.1. LES ARTICULATIONS

4.1.1. DÉFINITION – CLASSIFICATION

Les articulations représentent le mode d'union des os entre eux. Selon qu'il existe une possibilité de mouvement ou non, on en distingue trois types. Les synarthroses ou sutures sont des articulations immobiles (par exemple entre les os du crâne). Les amphiarthroses ne permettent que des mouvements limités. C'est le cas des os du bassin entre eux ou des deux os de la jambe. Les diarthroses ont une liberté de mouvement plus ou moins importante. Ce sont celles qui intéressent le sportif en général et le cycliste en particulier.

4.1.2. ANATOMIE ET PHYSIOLOGIE DES DIARTHROSES

Les diarthroses sont toutes construites de la même manière avec des surfaces articulaires, du cartilage, une capsule, des ligaments et des muscles.

4.1.2.1. Les surfaces articulaires

Les surfaces articulaires sont façonnées par les mouvements de l'articulation sous l'action des différents muscles. La congruence entre elles n'est pas toujours parfaite. Celle-ci est améliorée soit par des bourrelets marginaux (exemple : le bourrelet cotyloïde de la hanche), soit par des disques fibro-cartilagineux pleins ou percés, en anneau ou en forme de croissant (exemple : les ménisques du genou).

4.1.2.2. Le cartilage

Les surfaces articulaires sont revêtues d'un cartilage qui leur permet de glisser les unes sur les autres. Le cartilage est lisse, souple et élastique, compressible et extensible. Il a une épaisseur variable selon la pression qu'il subit. Celui de la rotule est le plus épais de l'organisme, nous l'avons vu. Mais le cartilage est peu résistant mécaniquement. Sa superficie est fonction de l'étendue des mouvements. Enfin, il se nourrit à partir de la synovie.

4.1.2.3. La capsule

La capsule ferme la cavité articulaire en s'insérant sur les os. Elle transforme ainsi l'articulation en une chambre étanche. La cavité définie est quasi virtuelle. La capsule est tapissée sur sa face interne par la synoviale. C'est elle qui sécrète la synovie dont les rôles sont de nourrir le cartilage et de lubrifier les surfaces articulaires. La capsule est lâche et forme des replis (de véritables plis d'aisance !) dans les zones correspondant aux besoins de liberté pour les mouvements de l'articulation (exemple : la bourse séreuse sous-quadriceps). A l'inverse, elle est renforcée là où c'est nécessaire pour empêcher un mouvement (exemple : le plan fibreux postérieur du genou). Ces renforts s'appellent ligaments capsulaires.

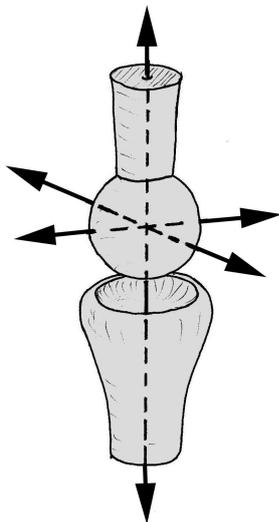


Figure 4.1. Représentation schématique d'une énarthrose.

4.1.2.4. Les ligaments

Les ligaments sont solides, flexibles et souples. Ils ont pour rôles de maintenir les surfaces articulaires en contact, de guider les mouvements et d'en assurer la précision, de soulager dans certains cas les muscles, pour le maintien de la position par exemple.

Ils sont très riches en récepteurs sensitifs et permettent de percevoir la position de l'articulation et la vitesse des mouvements. Certains ne sont qu'un épaississement de la capsule articulaire qu'ils renforcent, nous venons de le voir. D'autres sont indépendants de la capsule (ex : les ligaments latéraux du genou) et représentent souvent d'anciens muscles réduits à leur tendon primitif.

4.1.2.5. Les muscles

Sans muscles, pas de mouvements et donc pas d'articulation. Ils mettent l'articulation en mouvement mais assurent aussi le contact des surfaces articulaires, soit par la pression qu'ils créent sur l'articulation (exemple : les fessiers pour la hanche), soit en contribuant à l'appareil capsulo-ligamentaire (exemple : le tendon rotulien et les expansions des vastes pour le genou).

4.1.3. CLASSIFICATION DES DIARTHROSES

On peut classer les diarthroses sur deux critères. Le premier est la configuration des surfaces articulaires. Le deuxième relève du nombre d'axes ou de degrés de liberté autour desquels peuvent se dérouler les mouvements. Sont ainsi distinguées les diarthroses à surfaces concordantes et à surfaces discordantes.

4.1.3.1 Les diarthroses à surfaces concordantes

Elles sont de quatre types, selon le nombre d'axes de mouvement.

Le premier type possède trois axes de mouvement. On les appelle énarthroses. Leurs surfaces articulaires sont des segments de sphère, l'un convexe et l'autre concave. Le meilleur exemple est la hanche.

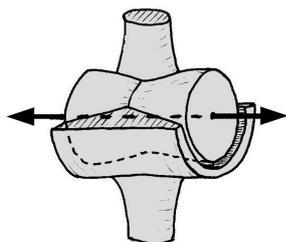


Figure 4.2. Représentation schématique d'une trochléenne.

Le deuxième type possède deux axes. Ce sont les articulations condyliennes et les articulations par emboîtement réciproque.

Le troisième type n'a qu'un axe. On distingue là encore les articulations trochléennes où l'une des surfaces a la forme d'une poulie (ex : l'articulation entre le fémur et la rotule, l'articulation de la cheville) et les articulations trochoïdes dans lesquelles les surfaces sont des segments de cylindre (ex : l'articulation supérieure entre le radius et le cubitus).

Les arthrodies sont un dernier type un peu particulier. Les surfaces articulaires sont planes, permettant des petits glissements dans tous les sens (ex : l'articulation antérieure astragalo-calcanéenne).

4.1.3.2. Les diarthroses à surfaces discordantes

L'exemple type en est le genou que nous examinerons plus bas.

4.1.4. LES CHAINES ARTICULAIRES

Une chaîne articulaire est une suite de segments et d'articulations qui fonctionnent ensemble. La chaîne articulaire est dite ouverte quand le plus distal des segments articulés entre eux possède une extrémité libre. Le chef d'orchestre qui bat la mesure ou le prêtre qui bénit ses paroissiens utilisent une chaîne articulaire ouverte. Elle est dite fermée quand les extrémités non articulées du premier et du dernier segments ont un point d'appui fixe. Le militaire qui fait des pompes réalise une chaîne fermée. La chaîne articulaire est semi-fermée quand une extrémité a un point d'appui fixe et l'autre est astreinte à se déplacer sur une trajectoire bien déterminée.

Ainsi, la cuisse, la jambe et le pied d'un cycliste forment une chaîne articulaire semi-fermée. Mais si on considère les axes du pédalier et de la pédale comme des articulations, on peut dire que la cuisse, la jambe, le pied et la manivelle du même cycliste forment une chaîne articulaire fermée. Dans un tel système fermé ou semi-fermé tout mouvement d'une articulation entraîne en général un mouvement des autres.

Nous en aurons l'illustration aux chapitres 7, 8 et 9.

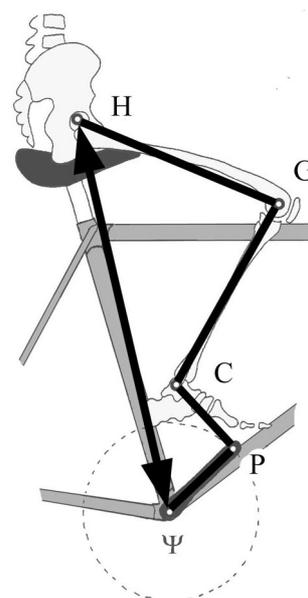


Figure 4.3. Les chaînes articulaires : Elle est semi-fermée pour le cycliste et fermée pour le cycliste + son vélo.

4.2. LA CHEVILLE

Deux mots se sont associés pour donner une bien belle image : cheville et ouvrière. La cheville crée la liberté du mouvement technique du cycliste. C'est une cheville ouvrière modeste et désintéressée.

4.2.1. ANATOMIE DE LA CHEVILLE

L'articulation de la cheville (tibio-tarsienne ou du cou-de-pied) est une articulation trochléenne emboîtée.

4.2.1.1. Les surfaces articulaires

Elles sont constituées en haut par la « mortaise » tibio-péronière et en bas par le « tenon » astragalien. La mortaise tibio-péronière présente trois faces articulaires : La face inférieure de l'extrémité inférieure du tibia, concave d'avant en arrière sur 70° d'arc de cercle, la face externe (ou tibiale) de la malléole interne et la face interne (ou péronière) de la malléole externe.

Le tenon astragalien oppose à la mortaise tibio-péronière trois facettes articulaires. Au dessus, se trouve la poulie astragalienne dont la gorge est dirigée d'arrière en avant et légèrement en dehors. Elle a un développement de 140 à 150° d'arc de cercle, plus important en arrière qu'en avant. Le cartilage y est épais. Latéralement, la poulie se continue par les facettes interne et externe.

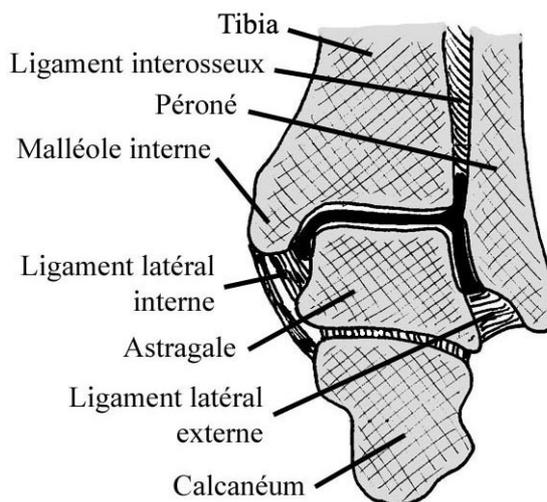


Figure 4.4. La cheville. Coupe frontale très schématique.

4.2.1.2. Les moyens d'union

La mortaise tibio-péronière est solidement unie par le ligament interosseux et par les ligaments antérieur et postérieur de l'articulation péronéo-tibiale inférieure. Une capsule et deux puissants ligaments latéraux maintiennent en contact les surfaces articulaires de la cheville. La capsule est renforcée en avant et en arrière par quelques lames fibreuses appelées ligaments antérieur et postérieur. Les ligaments latéraux sont beaucoup plus conséquents et robustes. Le ligament latéral externe part de la malléole externe et se dirige vers l'astragale et le calcaneum. Le ligament latéral interne s'insère sur la malléole interne et la relie au scaphoïde, à l'astragale et au calcaneum.

4.2.2. LES MOUVEMENTS DE LA CHEVILLE

La cheville ne possède qu'un seul degré de liberté, celui de la flexion-extension autour d'un axe transversal compris dans le plan frontal du corps. Il permet le mouvement de pédalage en y jouant un rôle fondamental comme nous le verrons. Les autres mouvements du pied sont dus aux contributions d'autres articulations, celles du genou et de la hanche et celles des articulations du pied.

La rotation axiale du genou fléchi permet des mouvements d'abduction (la pointe du pied se porte en dehors) et d'adduction (la pointe du pied se porte en dedans). Ce point est important, nous le verrons à propos des cales sous les chaussures (en 10.1.3.2). Genou étendu, c'est la rotation de la hanche qui est mise à contribution. L'abduction et l'adduction du pied peuvent être le fait des seules articulations du tarse postérieur, mais les mouvements ont alors une faible amplitude. La mise en jeu des mêmes articulations du tarse postérieur permet la pronation (la plante du pied regarde en dedans) et la supination (la plante regarde en dehors) du pied autour de son axe longitudinal. En principe, ces mouvements ne devraient pas intéresser le cycliste.

Rappelons qu'à partir de la position de référence, dans laquelle le plan de la plante du pied est perpendiculaire à l'axe de la jambe, la flexion de la cheville rapproche le dos du pied de la face antérieure de la jambe. Son amplitude varie, selon les individus, de 20 à 30°. Nous verrons pourquoi plus loin. À l'inverse, l'extension de la cheville tend à placer le pied dans le prolongement de la jambe. Son amplitude varie de 30 à 50°. Dans la flexion ou l'extension extrêmes, quelques degrés supplémentaires peuvent être gagnés par la mise en jeu des articulation du tarse. Cela joue un rôle mineur dans le pédalage qui n'utilise pas toute l'amplitude de la cheville.

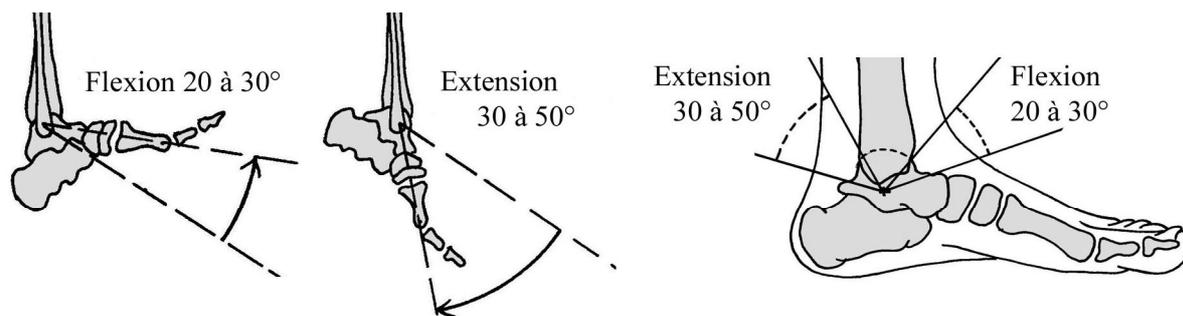
4.2.3. UNE LIBERTÉ LIMITÉE

L'articulation de la cheville est intégrée au complexe articulaire de l'arrière pied qui est composé par la cheville (qui en est « la reine » d'après Louis-Hubert Farabeuf), le genou pour ce qui est de sa rotation axiale en position fléchie, l'articulation astragalo-calcanéenne ou sous-astragaliennne et l'articulation médio-tarsienne. Cet ensemble réalise l'équivalent d'une seule articulation à trois degrés de liberté, permettant l'adaptation du pied aux accidents de terrain. Seules nous intéressent ici la cheville et les deux articulations qui lui sont mécaniquement liées : les articulations péronéo-tibiales supérieure et inférieure.

4.2.3.1. Facteurs limitant la flexion-extension de la cheville

La cheville est une articulation à un seul degré de liberté, et vraiment un seul, la flexion-extension. Cette exclusivité est due à sa conformation anatomique qui en fait une trochléenne très emboîtée. Non seulement la liberté de la cheville est limitée à un seul mouvement, mais encore ce mouvement est limité dans ses amplitudes. Comment pourrait-il en être autrement pour une articulation qui supporte la quasi-totalité du poids du corps et les contraintes de l'exercice physique ?

L'amplitude des mouvements de flexion-extension de la cheville est déterminée par la configuration anatomique des surfaces articulaires. Nous avons vu plus haut (en 3.2.1.1) que la surface tibiale a un développement de 70° d'arc de cercle et que la poulie astragaliennne a un développement d'environ 140 à 150°. Il ne reste pour la flexion-extension que 70 à 80° : 20 à 30° pour la flexion et 30 à 50° pour l'extension. Les facteurs limitants sont donc d'abord osseux, l'astragale venant buter sur les marges de la surface tibiale. Mais ils sont aussi capsulo-ligamentaires et musculaires, tout l'appareil articulaire agissant en cohérence.



Figures 4.5, 4.6 et 4.7. Les limites du jeu de la cheville. La flexion est limitée à 30°, l'extension à 50%. Ce sont les contraintes osseuses qui expliquent ces amplitudes relativement faibles.

4.2.3.2. Le rôle des articulations péronéo-tibiales

Les articulations péronéo-tibiales sont mécaniquement liées à la cheville. En effet, la flexion-extension de la tibio-tarsienne entraîne la mise en jeu automatique de ces deux articulations. Ce sont deux arthrodies. Les deux os de la jambe sont unis en haut et en bas par des ligaments antérieur et postérieur et sur presque toute leur longueur par le ligament interosseux. La largeur de la poulie astragaliennne est plus importante (de 5 mm environ) en avant qu'en arrière. L'écart entre les deux malléoles augmente donc pendant la flexion et diminue lors de l'extension. Ce mouvement d'écartement et de rapprochement des malléoles s'accompagne d'une légère rotation axiale de la malléole externe. Ce n'est pas tout. Lors de la flexion de la cheville, le péroné s'élève un peu. Pendant l'extension, il s'abaisse. Le but de ces mouvements annexes est l'adaptation permanente aux variations de largeur et de courbure de la poulie astragaliennne et donc la garantie de la stabilité transversale de la tibio-tarsienne.

4.2.3.3. Au total

La cheville est une articulation dont la liberté de mouvement est très limitée. Les deux chevilles supportent plus de 97 % du poids du corps et subissent donc des contraintes très importantes lors de la marche, de la course à pied ou du saut. Ces contraintes sont considérablement allégées sur un vélo puisqu'elles ne supportent plus que la force d'extension du membre inférieur dans la première phase du pédalage. Nous verrons (chapitres 7 et 8) que c'est le jeu de cette articulation qui rend le pédalage fluide et efficace par contribution propre au passage des deux phases de transition et par un bon positionnement du genou et de la hanche.

4.3. LE GENOU

Le genou, c'est le tendon d'Achille du cycliste si l'on veut bien me permettre ce jeu de mot facile. Mais cette articulation est aussi la plus exposée. C'est vrai dans presque tous les sports, le football par exemple. Le genou est une merveille de biomécanique, un bijou physiologique. On verra plus loin la sérénité, la robustesse et la puissance de la hanche et les espaces de liberté créés par la cheville. Entre les deux, le genou. Un ménage à trois, stable, sans trop de conflits et finalement le plus souvent durable... sauf erreur de gestion !

4.3.1. ANATOMIE DU GENOU

Le genou est une diarthrose à surfaces discordantes, mais c'est aussi une articulation trochléenne un peu particulière qui réunit le fémur au tibia et à la rotule. Il s'agit donc d'une articulation fragile, souvent lésée, qui assure sa stabilité d'une façon miraculeuse par un appareil ligamentaire complexe mais remarquable sur le plan mécanique, et par son environnement musculaire.

4.3.1.1. Les surfaces articulaires

Elles sont constituées par l'extrémité inférieure du fémur, l'extrémité supérieure du tibia, les ménisques interarticulaires et la face postérieure de la rotule. La surface articulaire de l'extrémité inférieure du fémur se compose en avant de la trochlée et en arrière des deux surfaces condyliennes. Celles-ci ont été comparées aux supports d'un rocking-chair. Leurs surfaces, convexes dans les deux sens vers le bas, dessinent une courbe spirale dont le rayon diminue d'avant en arrière. La figure 4.8 montre une coupe frontale du genou.

L'extrémité supérieure du tibia reçoit les surfaces condyliennes du fémur dans les deux cavités glénoïdes. On peut effectivement parler de cavité dans la mesure où la courbure transversale des glènes, correspondant à la courbure convexe des condyles, est bien concave. Mais il n'en va pas de même pour le profil antéro-postérieur des glènes. Si la glène interne est bien concave vers le haut, la glène externe est convexe vers le haut. Au centre des cavités glénoïdes, le cartilage est très épais, ce qui témoigne des pressions qu'il subit dans la position debout et ce qui a pour effet de diminuer ou d'annuler leur concavité.

La rotule entre en contact avec la trochlée fémorale par la surface articulaire de sa face postérieure, surface qui épouse en négatif les formes de la poulie fémorale. Le cartilage y est aussi très épais. C'est même l'endroit de l'organisme où le cartilage est le plus épais, nous l'avons déjà noté.

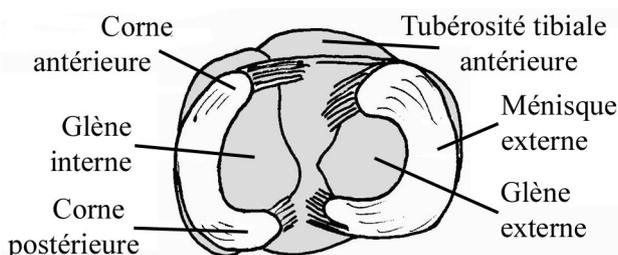


Figure 4.9. Le genou. Les ménisques vus du dessus. Insertions sur le plateau tibial.

La face périphérique est cylindrique et fixée à la capsule articulaire et aux ligaments et tendons qui la renforcent. Les cornes des deux croissants méniscaux sont fixées au plateau tibial dans la surface entre les deux glènes.

4.3.2. LES MOYENS D'UNION DU GENOU

Le genou, articulation instable par conformation anatomique, est stabilisé par une capsule, des ligaments et des muscles péri-articulaires.

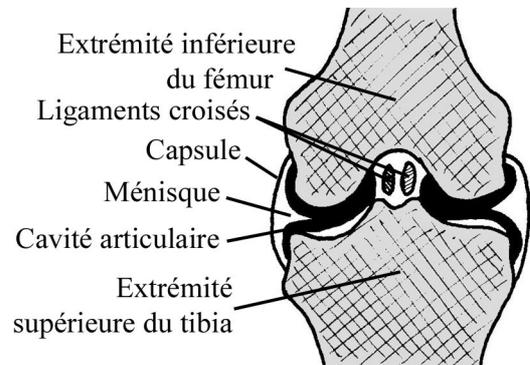


Figure 4.8. Le genou. Coupe frontale très schématisée.

4.3.1.2. Les ménisques interarticulaires

Ils viennent rendre les surfaces fémorales et tibiales concordantes. Ce sont deux lames prismatiques triangulaires recourbées en forme de croissant, ouvertes l'une vers l'autre. Leur face supérieure est concave et reçoit le condyle correspondant. La face inférieure est à peu près plane et repose sur le pourtour des glènes.

4.3.2.1. La capsule articulaire du genou

Elle s'insère sur le fémur, sur le tibia, sur la face périphérique des ménisques et sur la rotule. Elle définit ainsi une seule cavité articulaire. Schématiquement, elle a la forme d'un cylindre dont la partie postérieure est déprimée, comme pour s'immiscer entre les deux condyles. Sur la face antérieure, une fenêtre est découpée dans laquelle vient se « sertir » la rotule.

4.3.2.2. Les ligaments du genou

Ils constituent un système complexe et essentiel, associant la capsule et ses renforcements, les ligaments proprement dits et les tendons des muscles du genou.

En avant, on trouve plusieurs éléments très robustes. Les ailerons rotuliens s'étendent des bords latéraux de la rotule aux condyles fémoraux. Ce sont des renforcements de la capsule. Le tendon rotulien est large et très épais. Les expansions tendineuses des deux vastes font partie d'un même ensemble fonctionnel avec le tendon rotulien. Enfin, l'aponévrose d'insertion du tenseur du fascia lata est située en dehors de la rotule.

A l'intérieur, on trouve le ligament latéral interne, large et très résistant. Il va du condyle interne à la partie supérieure de bord interne du tibia, en arrière de l'insertion des muscles de la patte d'oie. On trouve aussi les muscles de la patte d'oie (demi-tendineux, couturier, droit interne) et le muscle demi-membraneux.

A l'extérieur, la stabilité du genou est assurée par le ligament latéral externe. C'est un cordon arrondi et épais, très solide, tendu du condyle externe à l'extrémité supérieure du péroné. Il est renforcé par le tendon du muscle biceps crural.

En arrière, on trouve, comme en avant, un important dispositif. Les ligaments croisés antérieur et postérieur sont deux cordons fibreux courts et très épais qui s'étendent de l'espace entre les deux glènes du tibia à l'espace inter-condylien du fémur. Ce sont des épaissements de la partie postérieure déprimée de la capsule articulaire. Nous y reviendrons plus loin. Le plan fibreux postérieur est tendu en arrière de l'espace inter-condylien, entre les deux condyles et le bord postérieur du plateau tibial. Enfin, le muscle poplité et les deux jumeaux du triceps sural jouent un rôle non négligeable dans la stabilisation du genou.

4.3.2.3. Un système complexe, à ménager

Ce système complexe constitué par les structures capsulaires, les ligaments et les muscles péri-articulaires porte le nom de « défenses périphériques du genou ». Ce vocable guerrier ne prouve qu'une chose, que nous ne cessons de répéter : l'articulation du genou est soumise à de fortes contraintes et doit être sollicitée par le sportif avec un maximum de précautions. Ceci est vrai chez le cycliste aussi. Certes, il ne fait pas subir au genou les pressions du poids du corps, entre le fémur et le tibia. Mais il sollicite énormément l'articulation entre le fémur et la rotule. Il doit donc veiller à ce que l'articulation travaille dans les meilleures conditions, comme nous le verrons plus bas à plusieurs reprises.

4.3.3. LES MOUVEMENTS DU GENOU

Le genou possède un degré de liberté principal : la flexion-extension qui autorise le pédalage. La flexion du genou est le mouvement qui rapproche la face postérieure de la jambe de la face postérieure de la cuisse.

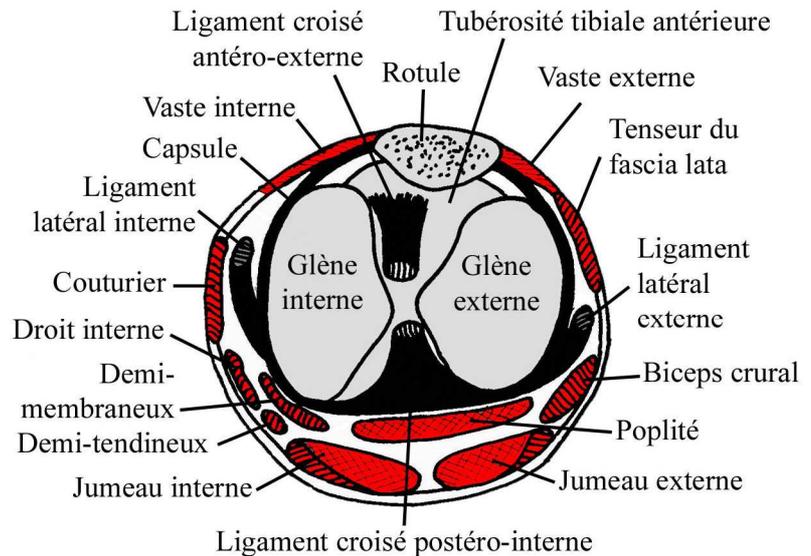
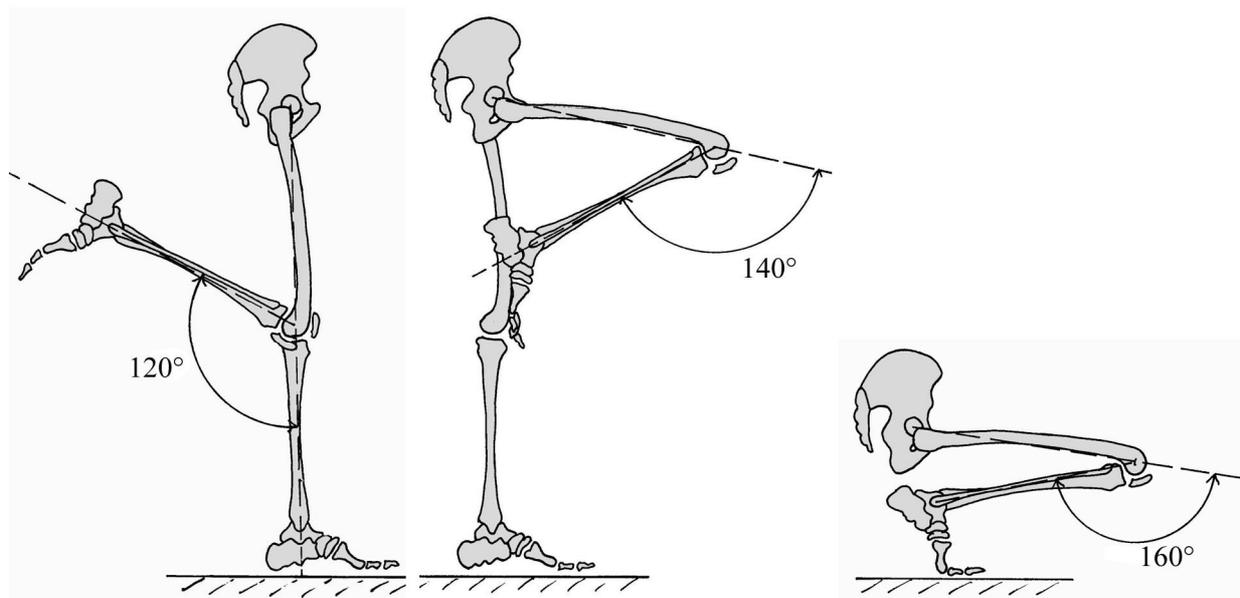


Figure 4.10. Le genou. Représentation schématique des moyens d'union de l'articulation sur une coupe horizontale vue du dessus.

Son amplitude va de 0° quand l'axe de la jambe est dans le prolongement de l'axe de la cuisse, jusqu'à 120° si la hanche est en extension. Mais elle peut atteindre 140° si la hanche est fléchie préalablement. Et même 160° en s'asseyant sur les talons, le talon touchant alors la fesse.

Le genou possède un deuxième degré de liberté, uniquement quand il est fléchi : la rotation autour de l'axe longitudinal de la jambe. En effet, lorsque le genou est en extension, cette rotation est interdite par la tension des ligaments latéraux et des ligaments croisés. Le mouvement de rotation axiale du genou intervient dans le pédalage comme mouvement parasite, parce qu'inutile, ainsi que nous le verrons plus loin (en 4.3.7). C'est cependant lui qui permet, quand la pédale est en haut, de dégager la chaussure des cales automatiques de la pédale en écartant le talon vers l'extérieur. Quand la pédale est en bas, le genou est moins fléchi et c'est le mouvement de rotation de la hanche qui permet de porter le talon en dehors en mettant en mouvement tout le membre inférieur.



Figures 4.11, 4.12 et 4.13. Le genou. Amplitude des mouvements de flexion du genou selon la position de la cuisse et du bassin. Elle est plus élevée si la hanche est fléchie.

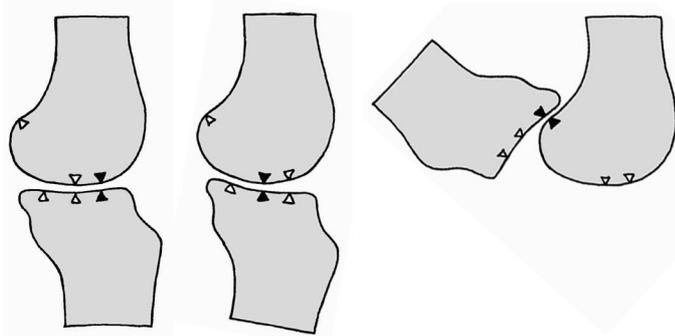
4.3.4. LA LIBÉRATION DE L'ARTICULATION FÉMORO-TIBIALE

Dans les gestes de la vie quotidienne, l'articulation entre le fémur et le tibia fonctionne avec la contrainte de la pesanteur. En station debout, elles supportent près de 95 % du poids du corps. Sur la bicyclette, il n'y a plus d'effets liés à la pesanteur. Ne persistent que les contraintes dues aux mouvements du pédalage, nous verrons qu'elles sont importantes mais très différentes.

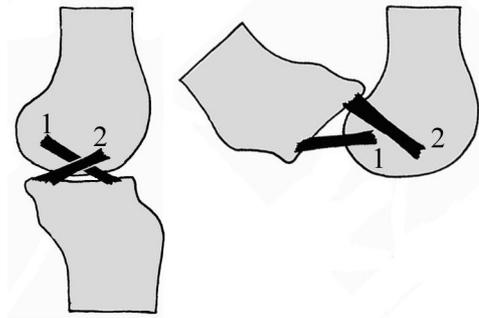
4.3.4.1. Les mouvements des condyles sur les glènes

Dans le sens antéro-postérieur, correspondant au mouvement de flexion-extension du genou, le développement de la surface articulaire du condyle fémoral est deux fois plus grand que la longueur de la glène tibiale. Pour éviter que chaque tour de pédalier ne se conclue par une luxation du genou (le condyle qui bascule en arrière de la glène), l'extrémité inférieure du fémur se déplace sur le plateau tibial à la fois en roulant et en glissant. À partir de la position de rectitude, le condyle commence par rouler sans glisser, puis le glissement devient progressivement prédominant et, en fin de flexion, le condyle glisse sans rouler. La longueur du roulement initial est différente suivant le condyle. Elle est moins importante pour le condyle interne.

Le roulement n'a lieu que pendant les 10 à 20 premiers degrés de flexion. Sauf si la selle est trop haute, ou les manivelles trop longues, il ne concerne pas le cycliste dont le genou est fléchi de $30 - 40^\circ$ à environ 115° . Pendant le pédalage, les mouvements du fémur sur le tibia sont donc des mouvements de glissement. Par contre, les premiers degrés de roulement correspondent à l'amplitude des mouvements de flexion-extension lors de la marche normale.



Figures 4.14, 4.15 et 4.16. Le genou.
Le roulement puis le glissement du fémur sur le tibia.



Figures 4.17 et 4.18. Le genou. Les mouvements des ligaments croisés pendant la flexion.

4.3.4.2. Le rôle essentiel des ligaments croisés

Les mouvements respectifs des condyles et des glènes sont évidemment contenus, contrôlés. Tout d'abord, le tibia (GC) et le fémur (HG) restent dans le même plan sagittal. La capsule et les ligaments latéraux sont là pour y veiller, même si ces derniers sont légèrement détendus lors de la flexion. Le tibia n'est pas toujours en train de se luxer en avant ou en arrière de l'extrémité inférieure du fémur. Capsule et ligaments latéraux jouent encore leur rôle. Le quadriceps en avant, les fléchisseurs du genou en arrière et notamment les deux jumeaux contribuent à la stabilité de l'articulation.

Ce sont les ligaments croisés qui ont la plus grande responsabilité. D'une part ils assurent la stabilité antéro-postérieure du genou, d'autre part ils permettent les mouvements de charnière dans la flexion-extension tout en maintenant les surfaces articulaires en contact. Les ligaments croisés, au nombre de deux par articulation, sont situés en plein centre de l'articulation du genou.

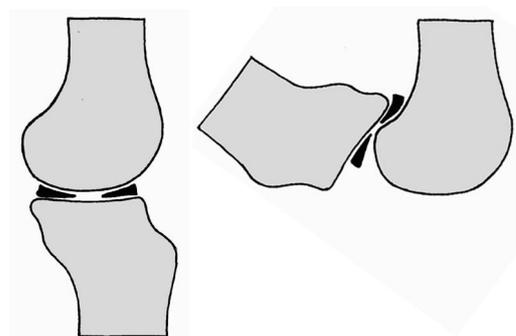
Le ligament croisé antéro-externe (1) s'insère en avant sur le plateau tibial, entre les deux glènes (voir les figures 4.10 et 4.17). Il se dirige en arrière, en haut et en dehors pour se terminer dans l'échancrure intercondylienne du fémur, sur la face interne du condyle externe.

Le ligament croisé postéro-interne (2) s'insère tout en arrière du plateau tibial, entre les deux glènes. Son trajet est oblique en avant, en haut et en dedans et il vient s'insérer sur la face intercondylienne du condyle interne.

Ces deux ligaments sont courts et très épais. Mais ce ne sont pas des cordes statiques. Ils sont élastiques et mobilisent plus ou moins leurs fibres selon les mouvements du genou. Schématiquement, on peut dire que la flexion du genou s'effectue autour du point d'insertion postérieur du ligament croisé antéro-externe et que pendant ce mouvement le ligament croisé postéro-interne maintient les surfaces articulaires en contact.

4.3.4.3. Les ménisques et leurs déplacements

Quand le genou se fléchit, le point de contact entre le condyle et la glène recule. Les ménisques suivent ce mouvement tout en se déformant, notamment parce qu'ils sont fixés par leurs cornes au plateau tibial. Les ménisques sont poussés par les condyles, mais aussi entraînés par les mouvements de la capsule et de ses renforts. Le ménisque externe recule deux fois plus que le ménisque interne. En position debout, les condyles appuient sur les glènes par leur plus grand rayon de courbure. Les ménisques sont alors idéalement interposés entre les surfaces de contact. Les efforts de compression sont bien répartis. Le genou assure sa stabilité. A l'inverse, dans le mouvement de flexion les condyles sont progressivement en contact avec les glènes par leur plus petit rayon de courbure. Les ménisques ne colent plus totalement aux condyles. Le genou privilégie alors la mobilité.

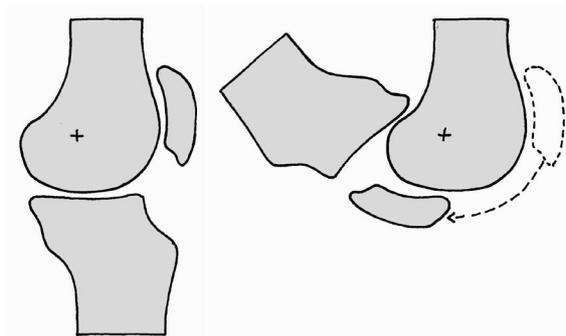


Figures 4.19 et 4.20. Le genou. Déplacements des ménisques pendant la flexion du genou.

4.3.5. L'ARTICULATION ENTRE LE FÉMUR ET LA ROTULE

4.3.5.1. Déplacements entre rotule et fémur

La rotule glisse dans le fond de la gouttière verticale formée par la poulie fémorale (la trochlée et l'échancrure inter-condylienne). Par rapport au fémur et pendant la flexion du genou, la rotule suit un mouvement de translation verticale et circonférentielle, centré par l'axe de flexion-extension du genou. Ce mouvement est important entre ses deux extrêmes, de deux fois la hauteur de la rotule. Il amène la rotule à regarder, par sa face postérieure, d'abord en arrière, puis, petit à petit, vers le haut. Pendant le pédalage, du fait des déplacements conjoints du fémur et du tibia, la rotule reste à peu près orientée de la même manière, c'est-à-dire avec une face postérieure qui regarde toujours en arrière et en haut. Elle se déplace par rapport au fémur d'un peu plus de sa longueur. Il existe autour de l'articulation du genou de nombreuses bourses séreuses péri-articulaires qui jouent un rôle de lubrification, notamment entre la rotule et le fémur. Citons, entre autres, la bourse séreuse sous-quadricipitale.



Figures 4.21 et 4.22. Le genou. Déplacement de la rotule sur le fémur pendant la flexion du genou.

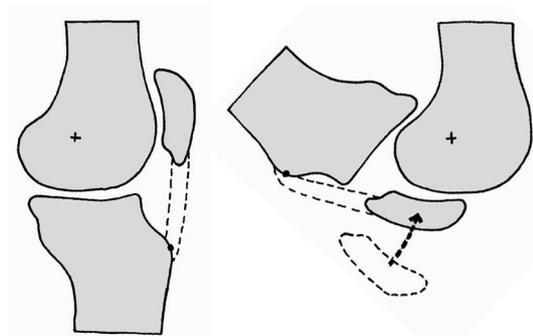
4.3.5.2. Le maintien de la rotule

La rotule est maintenue appliquée au fond de la gorge de la poulie fémorale par le simple effet de la contraction du muscle quadriceps. La force qui applique la rotule contre la trochlée est considérable. Il suffit pour s'en persuader de faire de simples calculs ou de constater l'épaisseur du cartilage sur sa face postérieure. La capsule et ses renforts ligamenteux assurent un maintien passif de la rotule contre la trochlée fémorale. On distingue de chaque côté, les ailerons rotuliens interne et externe, qui vont de la rotule aux condyles fémoraux, et les ligaments méniscaux-rotuliens, qui vont du bord convexe des ménisques à la rotule.

4.3.6. LA ROTULE ET LE TIBIA

4.3.6.1. Déplacements entre rotule et tibia

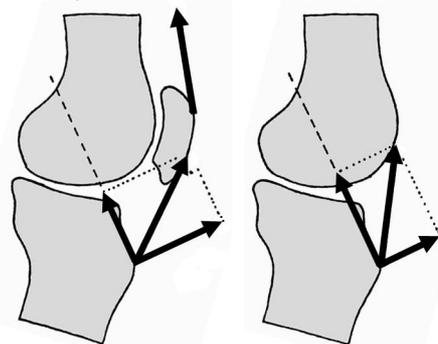
La rotule est solidement reliée au tibia par le tendon rotulien. Pendant les mouvements de flexion-extension du genou, elle se déplace par rapport au tibia, dans un plan sagittal, le long d'un arc de cercle dont le centre est situé sur la tubérosité tibiale antérieure et dont le rayon est égal à la longueur du tendon rotulien. La rotule subit un mouvement de translation circonférentiel qui l'amène à reculer et à basculer en arrière et en bas. Ce mouvement est dû au déplacement vers l'arrière du point de contact entre les condyles et les glènes, au fur et à mesure que la flexion s'accroît. Il est aussi dû au profil des condyles qui diminue d'avant en arrière la distance de la rotule à l'axe de flexion-extension du genou.



Figures 4.23 et 4.24. Le genou. Déplacements de la rotule par rapport au tibia.

4.3.6.2. Intérêt de la rotule par rapport au quadriceps

La poulie fémorale reçoit la terminaison de l'appareil extenseur du genou constitué par le tendon quadricipital, la rotule et le tendon rotulien. La rotule sert ainsi, par rapport à un plan sagittal, à transformer la force du quadriceps, dirigée en haut et un peu en dehors, en une force verticale. La rotule joue un deuxième rôle essentiel, et qui lui est propre. Elle accroît l'efficacité du quadriceps en éloignant le tendon quadricipital de l'axe de flexion-extension du genou, ce qui a pour effet d'augmenter le bras de levier des muscles extenseurs du genou.



Figures 4.25 et 4.26. Le genou. La rotule augmente le bras de levier du quadriceps.

4.3.7. LA ROTATION INTERNE AUTOMATIQUE DU GENOU

Le début de la flexion du genou s'accompagne d'une discrète rotation interne du genou qui porte la pointe du pied en dedans ou le talon en dehors. Il y a de bonnes raisons pour expliquer cette rotation automatique. La première est que le condyle externe « recule » plus que l'interne lors de la flexion du genou. En effet, le condyle externe roule plus longtemps que l'interne comme nous l'avons vu au paragraphe 4.3.4.1. Ensuite, la glène interne, plus concave que l'externe, « retient » mieux le condyle interne. Enfin, le ligament latéral interne laisse moins de champ au condyle interne que son homologue externe. La deuxième raison est musculaire. Les muscles fléchisseurs du genou sont à prédominance rotateurs internes. Pour bien observer cette rotation interne automatique, il suffit de marcher derrière quelqu'un et de regarder le mouvement de ses talons pendant la marche. Au début de la flexion du genou, au moment où le talon quitte le contact avec le sol, on le voit se porter légèrement en dehors.

Chez le cycliste, ce mouvement ne devrait pas se produire, ou plutôt s'est déjà produit, car la flexion du genou est au minimum de 30°, au-delà des angles de rotation automatique. Ce mouvement peut cependant venir parasiter le pédalage si la selle est trop haute, comme nous le verrons aux chapitres 8 et 9. Dans ce cas, si la partie antérieure du pied est fixée sur la pédale sans jeu latéral, la rotation interne automatique du genou se manifeste par un léger déplacement en dehors du talon et/ou par un léger déplacement en dedans du genou, avec une désaxation du tendon rotulien et une mauvaise congruence de la rotule dans la poulie fémorale.

4.4. LA HANCHE

La hanche est une articulation puissante et peu fragile. Elle est très efficace chez le cycliste.

4.4.1. ANATOMIE DE LA HANCHE

La hanche ou articulation coxo-fémorale est une énarthrose. La surface convexe est celle de la tête fémorale. La cavité cotyloïde de l'os iliaque est concave et reçoit la tête fémorale. La tête fémorale est très emboîtée dans la cavité cotyloïde parce que cette union est renforcée par les cartilages articulaires, le bourrelet cotyloïde et tout l'ensemble de la capsule, des ligaments et des muscles péri articulaires. La hanche est donc une articulation très stable, quasiment impossible à luxer, mais dont la mobilité est relativement limitée, notamment si on la compare à l'énarthrose de référence qu'est l'épaule (nous en parlerons au chapitre 9).

4.4.1.1. Les surfaces articulaires

Ce sont la tête du fémur, la cavité cotyloïde de l'os iliaque et le bourrelet cotyloïdien. La tête du fémur représente les deux tiers d'une sphère. Elle est recouverte d'un cartilage plus épais dans sa partie supérieure et le centre de la tête que dans sa partie inférieure. La cavité cotyloïde est presque hémisphérique. La surface articulaire a la forme d'un croissant ouvert en bas, juste au-dessus du trou ischio-pubien. Le cartilage est là aussi plus épais en haut qu'en bas. Le bourrelet cotyloïdien est un anneau complet dont la coupe est triangulaire. Il adhère par sa base à l'os iliaque, autour de la cavité cotyloïde, sauf dans l'ouverture inférieure du croissant cotyloïdien. Il réduit les inégalités du rebord de la cavité cotyloïde et la transforme en une anfractuosités un peu plus grande qu'une demi-sphère. Le bourrelet est plus épais en haut et en arrière qu'en bas et en avant.

4.4.1.2. Les moyens d'union

Les surfaces de l'articulation de la hanche sont maintenues en contact par la capsule articulaire, par les ligaments qui renforcent cette capsule et par un ligament indépendant, le ligament rond. La capsule articulaire a la forme d'un manchon cylindrique étendu de l'os iliaque à l'extrémité supérieure du fémur.

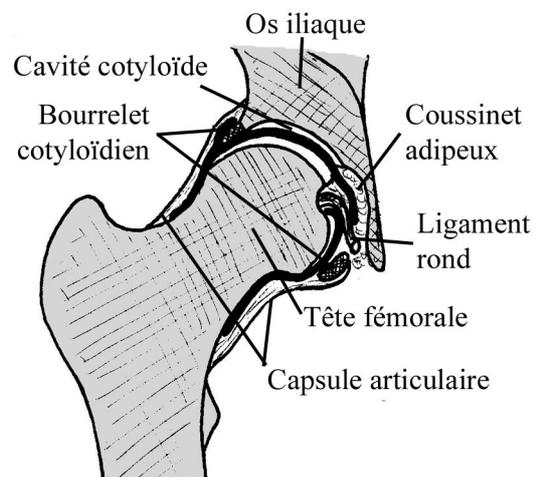


Figure 4.27. La hanche. Coupe schématique quasi frontale de l'articulation.

Les ligaments qui entourent l'articulation ne sont que des renforcements de la capsule. Mais ils sont puissants. Tous ces ligaments, en partant de l'os iliaque et en allant au fémur, sont « enroulés » autour du col du fémur dans la position debout. Sur la hanche droite vue du dehors, ils le sont dans le sens des aiguilles d'une montre. C'est l'inverse pour la hanche gauche. Ceci est une conséquence probable du passage de la position quadrupède de nos lointains ancêtres à la position érigée.

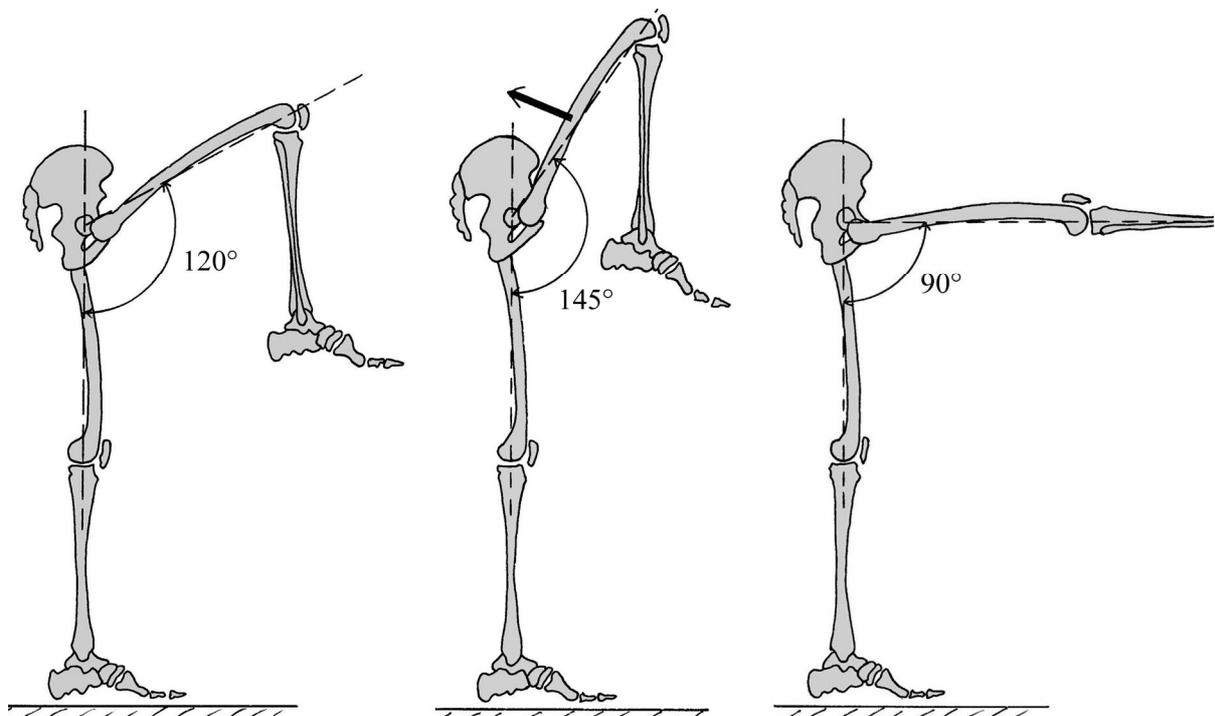
Chez le cycliste, la flexion permanente de la hanche déroule les renforts de la capsule. Il ne faut pas en conclure que la bicyclopédie est un retour en arrière de l'évolution. Ce que l'on peut dire, cependant, c'est que la position du cycliste est plus proche de celle d'un quadrupède que de celle d'un bipède : il a quatre points d'appui, et même cinq si l'on compte la selle. Mais seuls les membres inférieurs sont locomoteurs.

Le ligament rond est une lame fibreuse de trois centimètres de longueur environ, qui s'étend du centre de la tête du fémur au bord supérieur du trou ischio-pubien. Ce ligament est contenu dans la cavité articulaire et est donc recouvert par la synoviale. Il est très résistant mais ne joue pas un grand rôle mécanique. Par contre, il contient dans son épaisseur des artérioles et veinules chargées de l'irrigation de la tête fémorale.

4.4.2. LES MOUVEMENTS DE LA HANCHE

La hanche permet d'orienter le membre inférieur dans toutes les directions. Elle possède donc trois degrés de liberté. Le premier est celui de la flexion-extension autour d'un axe transversal. Il permet le mouvement de pédalage. Le deuxième permet d'écartier ou de rapprocher le membre inférieur du plan sagittal du corps. Il s'agit de l'abduction-adduction autour d'un axe antéro-postérieur, perpendiculaire au plan frontal. Le troisième autorise les rotations externe et interne du membre, pour porter la pointe du pied en dehors ou en dedans. Il s'effectue autour d'un axe vertical ou autour de l'axe longitudinal de la cuisse. La combinaison de ces trois mouvements élémentaires réalise un mouvement beaucoup plus complexe qu'on appelle la circumduction de la hanche. Il permet de faire des « ronds de jambe ».

La flexion de la hanche se définit comme le mouvement qui porte la face antérieure de la cuisse à la rencontre du tronc. Elle a une amplitude qui va de 0° quand l'axe de la cuisse est dans le prolongement du tronc, jusqu'à 90° si le genou est étendu, 120° environ si ce dernier est fléchi. Le mouvement peut aller au-delà de 140° en cas de flexion passive avec les genoux fléchis. Dans ce cas, la flexion est accentuée par une autre force que celle des fléchisseurs de la hanche, celle des bras par exemple qui cherchent à rapprocher le genou du tronc. L'extension de la hanche porte le membre inférieur en arrière du plan frontal du corps. Elle est faible et ne dépasse guère 20°. Pendant le pédalage, la hanche est toujours fléchie. L'extension n'y est que relative. Il ne s'agit que d'une diminution de la flexion. Voir les figures 4.28, 4.29 et 4.30.



Figures 4.28, 4.29 et 4.30. La hanche. Amplitudes des mouvements de flexion selon la flexion du genou et selon que le mouvement est aidé ou non.

4.4.3. UNE ARTICULATION SOULAGÉE CHEZ LE CYCLISTE

Nous allons voir que la bicyclette, si on soit bien posé dessus, fait travailler la hanche dans des conditions très favorables. Et nous verrons, dans les chapitres suivants, que la hanche sait être reconnaissante.

4.4.3.1. Une hanche en apesanteur

Sur un sujet debout, les deux hanches supportent 70 % du poids du corps. Mais la hanche du cycliste n'est pas soumise aux mêmes contraintes que la hanche d'un marcheur. Le cyclisme est un sport assis et le poids du tronc, de la tête et des membres supérieurs ne porte plus sur les hanches. Il est réparti en avant sur les mains en appui sur le guidon (pour un tiers à peu près) et en arrière sur le périnée et les ischions en étroit contact avec la selle (pour les deux tiers restants). La hanche du cycliste travaille donc sans subir l'action de la pesanteur. Les pressions qui s'exercent sur elle ne sont plus dues qu'à la force de réaction à l'extension du membre inférieur liée au pédalage. Elles sont moins importantes et ne sont plus concentrées dans la partie supérieure de la tête fémorale et de la cavité cotyloïde.

Le système de porte-à-faux constitué par la diaphyse, le col et la tête fémorale, est moins sollicité. La poignée formée par le bras de levier du col fémoral et la diaphyse ne subit plus les sujétions liées à la station debout. On peut même dire que les pressions intra-articulaires sont négatives, en dehors du pédalage, si le cycliste retire ses pieds des pédales et laisse pendre ses deux membres inférieurs.

4.4.3.2. Des surfaces articulaires en correspondance

Le rapport des surfaces articulaires change lui aussi. En station érigée, la tête fémorale n'est pas entièrement recouverte par le cotyle : toute la partie antéro-supérieure de son cartilage est à découvert. Ceci semble être, là encore, une conséquence de l'évolution qui a fait passer l'homme de la déambulation quadrupède à la marche bipède... Pendant le pédalage, la hanche est toujours en position fléchie, de 30 à 70° environ. Le genou est un tout petit peu écarté par rapport à la position debout, il est en très légère abduction. Tout ceci améliore la coïncidence des surfaces articulaires de la tête et du cotyle. En pédalant, on place la hanche dans une posture proche de celle qu'elle avait du temps de la quadrupédie. Décidément !

4.4.3.3. Des ligaments relâchés

Le ligament rond ne joue aucun rôle pendant les mouvements du pédalage. Il se contente de s'entortiller sur lui-même pendant la flexion et de se détortiller pendant l'extension relative. Nous avons vu plus haut que la flexion de la hanche détend les ligaments qui renforcent la capsule articulaire. Ce relâchement ligamentaire n'est pas un facteur de bonne coaptation de l'articulation coxo-fémorale. Mais comme nous allons le voir, ça tient quand même.

4.4.3.4. Une articulation qui se tient bien

En position de rectitude (le garde-à-vous), la pesanteur est un facteur de coaptation de la hanche car le toit formé par le cotyle et le bourrelet recouvre suffisamment la tête fémorale (voir la coupe transversale de la hanche sur la figure 4.27). Cet effet de la pesanteur n'intervient plus dans le pédalage. La seule pression atmosphérique, du fait de l'étanchéité de la cavité articulaire, est un facteur important de maintien en contact des deux surfaces articulaires.

Mais ce sont les muscles qui jouent le rôle essentiel dans la coaptation de la hanche, et ceci est d'autant plus nécessaire que les ligaments se sont mis presque hors course. Les seuls muscles efficaces sont ceux dont la direction est transversale, plus ou moins parallèle à l'axe du col fémoral. Lors de leur contraction, ils appliquent la tête fémorale dans la cavité cotyloïde. Ces muscles à direction transversale plus ou moins prédominante sont les suivants : Le pyramidal, l'obturateur externe, l'obturateur interne, le carré crural, le pectiné, le petit fessier, le moyen fessier et le grand fessier. Pendant le pédalage, ils vont avoir une action sur la coaptation d'autant plus forte qu'ils participent au mouvement de flexion extension. Quand on voit la liste ci-dessus, on ne peut qu'être rassuré : la tête fémorale n'est pas près de sortir de la cavité cotyloïde. Et ce ne sont pas les muscles à direction longitudinale qui y arriveront : Les ischio-jambiers, les adducteurs, le psoas iliaque...

4.5. LES SEGMENTS CORPORELS

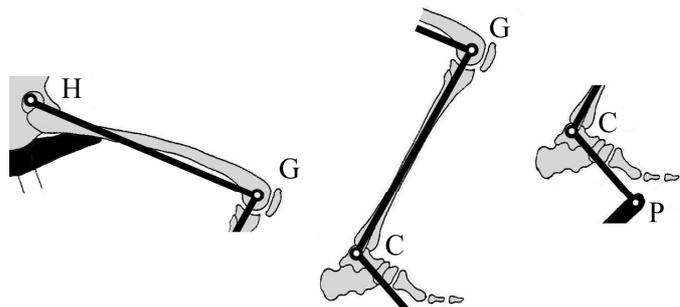
4.5.1. RÉFLEXIONS SUR LES SEGMENTS CORPORELS

La définition des segments corporels a déjà été ébauchée au chapitre un. Allons plus loin. Nous venons de voir que les axes de flexion-extension des trois articulations du membre inférieur ne coïncident pas toujours avec ce que le bon sens pourrait appeler le cœur de l'articulation, c'est à dire l'espace interarticulaire. Certes, ces axes sont en proximité de l'articulation, mais ils ne traversent pas toujours la cavité articulaire.

L'axe de flexion-extension de la cheville passe par les deux malléoles, environ un centimètre en dessous de la face inférieure de l'extrémité inférieure du tibia. Celui du genou traverse les condyles fémoraux, nettement au dessus de l'interligne entre le tibia et le fémur. Celui, enfin, de la hanche traverse le centre géométrique de la tête fémorale.

Ce qui nous intéresse en biomécanique, c'est la longueur fonctionnelle des leviers que l'on appelle segment corporel. Celle-ci se mesure, au moins chez les cyclistes, entre les axes de flexion-extension des différentes articulations. Ainsi, le fémur est plus long que le segment corporel correspondant. L'os de la cuisse mesure près de 110 % de la longueur de son segment. Par contre, le tibia est moins long que le segment de la jambe et n'en mesure qu'environ 90 %. Pendant le pédalage, la longueur du segment de la cuisse est constante. Ce n'est pas le cas de la longueur du segment de la jambe qui diminue, très légèrement, pendant la flexion. Ceci est dû à la diminution d'avant en arrière du rayon de courbure des surfaces condyliennes de l'extrémité inférieure du fémur.

Le segment corporel du pied est plus complexe à définir puisqu'il est terminal et ne s'étend pas entre deux axes de flexion-extension mais de la cheville au bout des orteils. Mais on peut considérer que la longueur fonctionnelle du pied va de l'axe C de flexion-extension de la cheville à celui O de l'articulation métatarsophalangienne du gros orteil, point d'application des forces d'extension du membre inférieur. Nous considérons, en fait, que le véritable « corporel » distal des membres inférieurs du cycliste joint l'axe de la cheville C à l'axe de la pédale P.



Figures 4.31, 4.32 et 4.33. Les trois segments corporels du cycliste. Le segment CP inclue la chaussure et la pédale.

4.5.2. MESURE DES SEGMENTS CORPORELS

Pour mesurer les segments corporels, il faut se donner des repères anatomiques. Nous avons vu (en 1.3.2.2) qu'il n'était pas facile de les identifier et que les mesures pouvaient être imprécises. Citons ces repères un à un, en référence aux axes de flexion-extension des articulations :

Le centre articulaire H de la hanche se situe au même niveau que le bord supérieur du grand trochanter, environ 10 mm en avant de son bord antérieur.

Le centre articulaire G du genou se situe au niveau de la tubérosité externe de la face latérale du condyle externe du fémur.

Le centre articulaire C de la cheville se situe au niveau du point le plus saillant de la face externe de la malléole externe.

Le centre articulaire de l'épaule se situe environ 25 mm en dessous du bord externe de l'acromion (l'os qui fait l'angle de l'épaule).

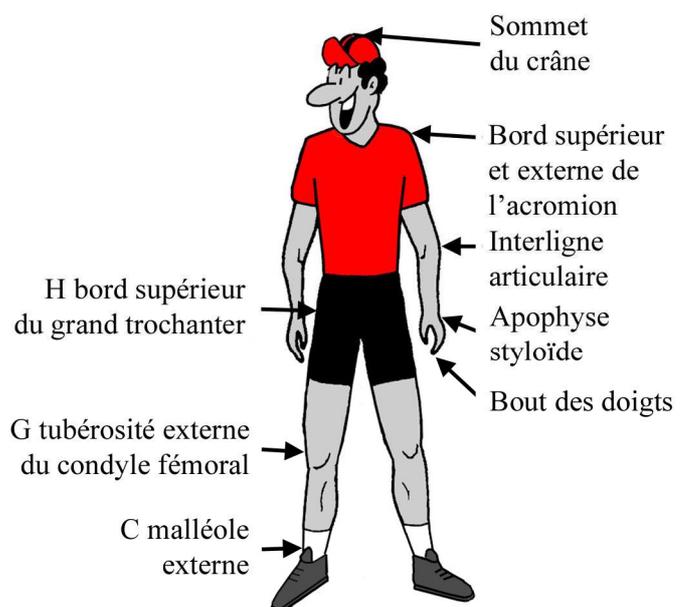


Figure 4.34. Les repères osseux permettant de mesurer (approximativement) la longueur des segments osseux.

Le centre articulaire du coude se situe environ 8 mm au-dessus de l'interligne articulaire entre le radius et l'humérus.

Enfin, le centre articulaire du poignet se situe au niveau de l'apophyse styloïde du radius.

De nombreux auteurs, médecins, physiologistes, anatomistes... ont travaillé sur les dimensions et les proportions des segments corporels. Ils ont fait des études anthropomorphiques et les ont transcrites sur des tables qui permettent de situer et de comparer tel individu par rapport à la moyenne de ses confrères. On sait ainsi s'il est grand ou petit, s'il a de longues jambes ou s'il est court sur pattes...

On trouvera de telles tables anthropomorphiques dans les références bibliographiques citées en fin de cet ouvrage, notamment dans le livre de Williams, Lissner et Le Veau (1986).

4.5.3. ET NOTRE CYCLISTE COBAYE ?

Nous avons fait un premier portrait de Maurice au chapitre 1 (en 1.4.1). Voici les mensurations de ses segments corporels. Si l'on se réfère aux tables anthropomorphiques, on vérifie que Maurice est « standard ».

La longueur du pied de Maurice (pointure = 43) est de 267 mm.

La différence de hauteur entre C et O est de 70 mm en position debout.

La distance entre les verticales de C et O est de 118,3 mm.

CO mesure donc 137,5 mm (racine carrée de $118,3^2 + 70^2$).

La jambe mesure 400 mm, c'est le segment corporel GC, et le tibia ne mesure que 371 mm.

La cuisse mesure 440 mm, c'est le segment HG, et le fémur mesure 483 mm. Rappelons que son entrejambe mesure 850 mm.

La longueur du tronc (de la hanche à l'épaule) est de 520 mm.

La longueur du tronc, du cou et de la tête, mesurée de H au sommet du crâne, est de 830 mm.

La hauteur du cou et de la tête, mesurée à partir de l'épaule jusqu'au sommet du crâne, est donc de 310 mm.

La longueur du bras est de 300 mm, alors que l'humérus mesure 340 mm.

Celle de l'avant-bras de 270 mm et le radius ne mesure que 250 mm.

La main mesure 200 mm jusqu'au bout des doigts.

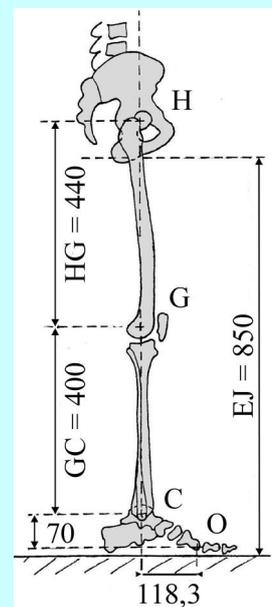


Figure 4.35. Les segments corporels des membres inférieurs de Maurice.