
Chapitre 7. LE TRAVAIL INTERNE

« *La poésie, c'est ce qu'il y a d'intime dans tout* »
Victor HUGO, *Odes et Ballades*, préface de 1822.

En nous appuyant sur les aspects anatomiques et physiologiques exposés dans les chapitres 3 à 6, nous allons maintenant analyser le travail interne du cycliste. D'abord nous rappellerons quelques généralités sur le fonctionnement musculaire puis nous examinerons les conditions de l'efficacité biomécanique des muscles, ensuite nous nous attacherons au cas particulier des muscles poly-articulaires. Ce sera le moment de tenter, pas à pas, une modélisation de la force de pédalage. Nous pourrons identifier les muscles mis en jeu à chaque instant du pédalage et reprendre l'analyse des quatre temps du pédalage tels que nous les avons mis en évidence au chapitre 2 (en 2.2), pour conclure sur le fait que, habituellement, le pédalage s'effectue avec deux membres inférieurs.

7.1. RAPPELS DE PHYSIOLOGIE MUSCULAIRE

7.1.1. PROPRIÉTÉS DU MUSCLE

Les muscles ont des propriétés remarquables, qui conditionnent directement leur fonctionnement et leur efficacité biomécanique. Ils sont extensibles, élastiques, excitables et contractiles. Examinons chacune de ces qualités.

7.1.1.1. L'extensibilité

Le muscle peut s'allonger jusqu'à 1,6 fois sa longueur de repos. Au-delà, que son allongement soit passif ou freiné, il se rompt.

7.1.1.2. L'élasticité

Comme tout corps élastique, le muscle reprend sa forme d'origine lorsque la cause qui le déforme cesse d'agir. Cette élasticité est quasi parfaite au début de l'étirement. Elle est due aux tendons, aux membranes et aux éléments non contractiles du muscle. L'élasticité sert de tampon. Elle protège le muscle, ses insertions musculaires, les ligaments, les tendons et les leviers osseux lors de brusques changements d'état. Elle permet aussi d'accumuler de l'énergie qui pourra être libérée ultérieurement, à la manière d'un arc tendu. Ce dernier phénomène joue un rôle important, notamment dans des mouvements rapides et rythmés, comme le pédalage.

7.1.1.3. L'excitabilité

Le muscle est physiologiquement excité par l'influx nerveux. Mais il est sensible à différents excitants qui provoquent une contraction. C'est le cas des excitants mécaniques (un choc par exemple), chimiques (certaines crampes), thermiques ou électriques (l'électrostimulation utilisée pour une musculation passive). L'influx nerveux est acheminé par des nerfs qui ont leur origine dans la moelle épinière. À leur entrée dans le muscle, ils se ramifient puis se distribuent de telle manière que chaque axone innerve un nombre plus ou moins important de fibres musculaires. On appelle unité motrice l'ensemble constitué par l'axone d'un motoneurone et les fibres musculaires innervées par les ramifications de cet axone. Chez l'homme, l'unité motrice peut ne comporter que quelques fibres musculaires quand une grande précision est requise, par exemple dans les muscles moteurs de l'œil. Les unités motrices de la cuisse possèdent à l'inverse plusieurs centaines de fibres musculaires. L'unité motrice agit suivant le principe du tout ou rien. Toutes les fibres musculaires qui la composent se contractent en même temps sous l'effet de la stimulation du nerf moteur.

7.1.1.4. La contractilité

C'est la propriété essentielle du muscle, la seule conséquence de son excitabilité, sa spécialité en quelque sorte. Sous l'effet d'un excitant, le muscle se contracte. Il tend alors à devenir plus court et plus épais, et à rapprocher ses insertions. Lorsqu'il y a déplacement d'un ou des segments osseux concernés, la contraction est appelée isotonique (ou anisométrique ou cinétique ou dynamique ou phasique). En général, les insertions du muscle se rapprochent, la contraction musculaire est dite concentrique. Quand la distance entre les insertions du muscle augmente, le muscle se contracte pour freiner un mouvement par exemple, la contraction est dite excentrique. Si la distance entre les insertions reste constante, la contraction musculaire est nommée isométrique (ou statique).

7.1.2. MÉCANISME INTIME DE LA CONTRACTION MUSCULAIRE

L'unité structurale du muscle est la fibre ou cellule musculaire. Chaque fibre est composée de faisceaux de myofibrilles. Les myofibrilles, à leur tour, sont composées de structures allongées plus petites, dont il existe deux types : l'actine et la myosine. C'est la disposition régulière des myofibrilles qui est responsable de l'aspect strié de la fibre musculaire squelettique.

7.1.2.1. L'énergie musculaire

Pour se contracter, le muscle a besoin d'énergie. Celle-ci lui est fournie par l'adénosine triphosphate (ATP). Nous verrons comment et dans quelles conditions au chapitre 13 (en 13.1).

7.1.2.2. L'actine et la myosine

L'actine et la myosine sont des protéines qui possèdent la propriété de se contracter ou plutôt de provoquer la contraction de leur environnement. Au repos, les filaments d'actine et de myosine apparaissent « dissociés ». Lors de la contraction musculaire, grâce à l'énergie libérée par l'ATP, ils s'emboîtent et tout se passe comme s'ils se trahaient mutuellement (figure 7.1). Si la contraction est isométrique, la longueur de la fibre ne diminue pas mais les filaments d'actine se rapprochent et leurs extrémités internes se recouvrent. Si la contraction est isotonique, le diamètre de la fibre augmente et sa longueur diminue.

Le raccourcissement de la fibre musculaire est limité : sa longueur en contraction maximale est égale à 60 % de sa longueur en position de repos. La même chose se produit pour le muscle, dont le raccourcissement est proportionnel (60 % toujours) à la longueur de ses faisceaux charnus.

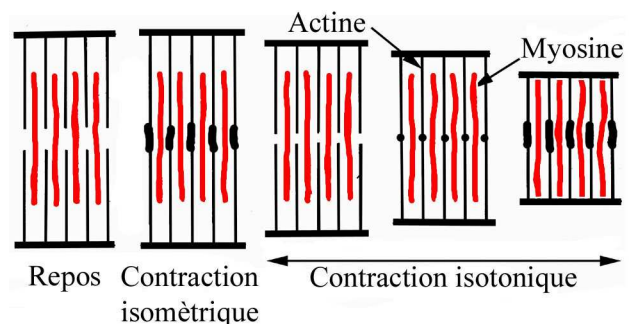


Figure 7.1. Illustration du mécanisme biochimique de la contraction musculaire.

7.1.2.3. Muscles blancs et muscles rouges

Tous les muscles squelettiques n'ont pas la même couleur. Certains sont pâles, d'autres sont pigmentés et ont une teinte sombre. On parle de muscles blancs et de muscles rouges. Les muscles rouges contiennent davantage de myoglobine. Cette protéine, proche de l'hémoglobine, a une forte affinité pour l'oxygène et une grande capacité à s'en séparer. Les muscles rouges sont capables de contractions soutenues, mais plus lentes. Ils sont moins excitables que les muscles blancs. Les muscles blancs travaillent en principe en courtes périodes et accomplissent des efforts rapides et brefs. En fait, les fibres rouges et blanches sont mélangées dans un même muscle en proportion variable. Par exemple, le soléaire possède plus de fibres rouges que les jumeaux. On peut imaginer qu'il agit d'abord pour transmettre l'énergie du pédalage fournie par les muscles de la hanche et du genou en positionnant correctement la cheville. Les muscles jumeaux, dans cette hypothèse, agiraient surtout pour apporter une contribution spécifique dans le geste même du pédalage en étendant la cheville au moment où c'est nécessaire. Nous reviendrons sur les différentes fibres musculaires à propos de la fréquence de pédalage, au chapitre 14 (en 14.2.2.2).

7.1.3. LA FORCE MUSCULAIRE

La force d'un muscle dépend du nombre de ses fibres et est proportionnelle à la surface de sa section fonctionnelle véritable, nous l'avons souligné plus haut, au chapitre 5 (en 5.1.1.4). Elle varie de 5 à 10 kg par cm^2 . Mais la force effectivement produite par le muscle dépend du nombre de fibres mobilisées. Il y a sommation des contractions de chaque unité motrice, dans le temps par stimulations itératives des fibres (sommation temporelle), dans l'espace par mobilisation simultanée des fibres (sommation spatiale). Tout dépend de la finalité de la contraction et de l'importance de l'effort à accomplir. La force contractile d'un muscle est également proportionnelle à la longueur des fibres au début de la contraction. Dans une certaine mesure, plus le muscle est allongé au préalable, plus la contraction est efficace. Nous y reviendrons ci-dessous (en 7.2.1).

7.1.4. TRAVAIL ET PUISSANCE MUSCULAIRE

7.1.4.1. Le travail musculaire

En physique, le travail est le produit d'une force par un déplacement. Lors d'une contraction isotonique ou cinétique, le travail musculaire sera bien le produit de la force musculaire par la longueur du raccourcissement du muscle. Lors d'une contraction isométrique ou statique, le déplacement étant nul, il n'y a pas de travail au sens des physiciens. Mais le muscle est bien sous tension et le siège de dépenses énergétiques. Pour le physiologiste, il y a bien travail. Il est appelé travail statique. Le travail effectué par une contraction isotonique est appelé travail dynamique. Il est moteur ou positif quand il surmonte la résistance qui lui est opposée. Il est résistant ou négatif quand il est surmonté par elle. Grâce aux changements de vitesses et aux nombreuses possibilités de braquets, le cycliste se situe toujours dans le créneau optimum de travail moteur. C'est heureux.

7.1.4.2. Puissance musculaire. Relation entre la force et la vitesse

La puissance est la quantité de travail délivrée par unité de temps. À force égale et à déplacement égal, la puissance délivrée est d'autant plus grande que le mouvement est plus rapide. C'est ce que recherchent les sportifs : développer une puissance maximale. Cela se traduit chez les cyclistes par la recherche d'une grande vitesse de rotation du pédalier. Le mécanisme de la contraction musculaire impose une relation entre la force développée par le muscle et la vitesse d'exécution du mouvement. Plus la force à appliquer est grande, plus le mouvement est lent (figure 7.2). Tout se passe comme si les réactions chimiques qui libèrent l'énergie à l'intérieur du muscle se déroulaient à une vitesse constante. L'allure à laquelle est libérée l'énergie nécessaire au mouvement est uniforme. Il faut moins de temps pour soulever un objet léger que pour soulever un objet lourd. Il y a donc chez le cycliste une recherche du meilleur compromis entre la force à appliquer sur la pédale et la fréquence de pédalage. Les braquets permettent de tirer le meilleur avantage possible de la relation entre la force et la rapidité et donc de produire la puissance optimale nécessaire. Nous y reviendrons, à propos de la fréquence de pédalage, dans le chapitre 14 (en 14.2).

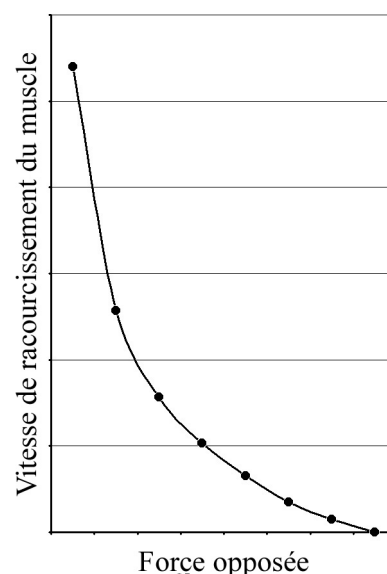


Figure 7.2. La relation force-vitesse.

7.1.5. AGONISTES ET ANTAGONISTES

Quand on parle d'un mouvement donné, les muscles qui font le mouvement sont dits agonistes ou synergiques. Ceux qui font le mouvement opposé sont dits antagonistes. Par exemple, le muscle grand fessier est agoniste dans l'extension de la hanche. Le psoas-iliaque, fléchisseur, est son antagoniste. Et réciproquement. Pour qu'un mouvement soit efficace, précis et ne mette pas en danger l'appareil locomoteur, il est souvent nécessaire qu'agonistes et antagonistes agissent de concert. Pour qu'un mouvement soit pur (c'est-à-dire, par exemple, la seule flexion de la hanche dans le seul plan sagittal : nous verrons en 9.3 ce qui se passe réellement), il faut que des antagonistes neutralisent les éventuelles actions accessoires et non désirées des muscles mobilisés.

Un mouvement donné est donc l'objet d'un compromis entre agonistes et antagonistes, sous le contrôle du cortex cérébral. Le cerveau ne « pense » muscle mais mouvement. Pour taper le mot vélo sur mon ordinateur, je ne pense pas fléchisseurs et rotateurs de l'épaule, extenseurs du coude, fléchisseur de l'index... mais presser avec mon index sur les touches v, é, l et o. Les centres sous-corticaux transforment l'ordre supérieur en une série d'influx qui vont coordonner et mettre en action les chaînes musculaires à mobiliser.

7.1.6. INSERTIONS MUSCULAIRES ET ORIENTATION DES FORCES

Il est impossible, la plupart du temps, de ramener l'insertion d'un muscle à un point puisqu'elle s'étale souvent sur une grande surface osseuse. De plus, les fibres d'un même muscle ne se mobilisent pas toujours toutes en même temps et n'ont pas toujours la même action. Par simplification, nous dirons que le point d'insertion d'un muscle est le centre géométrique de la ligne ou de la surface d'insertion. Ce centre est donc bien souvent un concept théorique.

L'angle d'insertion d'un muscle sur l'os, que ce soit directement par ses fibres ou par l'intermédiaire d'un tendon, n'est pas non plus toujours facile à mettre en évidence. Il peut de plus varier pendant le mouvement en fonction de la position des segments osseux, mais aussi parce que la position du muscle est elle-même modifiée par ce mouvement. Par exemple, la contraction simultanée des petit, moyen et grand fessiers éloigne la masse du grand fessier de l'axe de flexion-extension de la hanche et accentue l'angle d'attaque des fibres du grand fessier sur son insertion fémorale. Petit et moyen fessiers se comportent, en se contractant, comme une poulie par rapport au grand fessier.

Le vecteur F représentant la force musculaire au point d'insertion est parallèle aux fibres musculaires ou à l'axe du tendon. Il peut se décomposer en deux vecteurs (figure 7.3). L'un, F' , est dirigé vers l'axe de l'articulation mise en mouvement. C'est la composante longitudinale de la force qui en général tend à assurer la congruence de l'articulation. L'autre, F'' , est perpendiculaire à F' . C'est la composante de rotation autour de l'axe du mouvement, la seule qui soit efficace par rapport au mouvement. Plus l'angle d'attaque des fibres musculaires ou du tendon est perpendiculaire à l'axe fonctionnel du segment osseux mobilisé, plus F'' est grand par rapport à F' , plus le muscle est efficace.

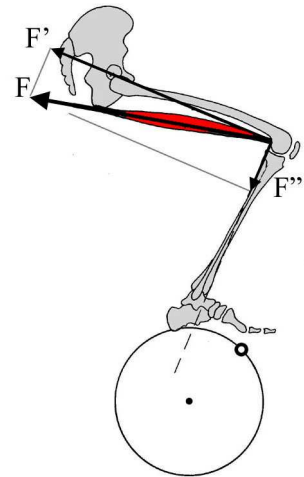


Figure 7.3. Décomposition de la force appliquée par le grand adducteur sur le condyle interne.

7.2. L'EFFICACITÉ BIOMÉCANIQUE DES MUSCLES

L'efficacité biomécanique des muscles dépend de quatre facteurs « mécaniques ». Ce sont l'étirement préalable, l'étendue de leur course, la force qu'ils peuvent développer et le moment de leur force par rapport à l'articulation mobilisée.

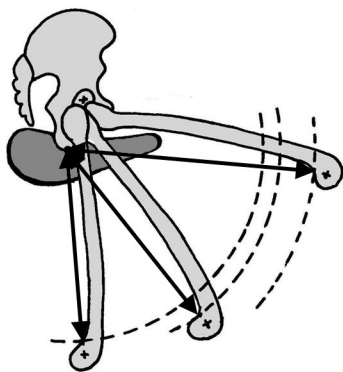


Figure 7.4. Étirement de la portion interne du grand adducteur par flexion préalable de la hanche. Cet étirement met le muscle dans des conditions idéales d'action. C'est ce qui se produit pendant le pédalage.

7.2.1. L'ÉTIREMENT PRÉALABLE

Nous avons vu ci-dessus (en 7.1.3) qu'un muscle étiré au préalable a une contraction plus efficace, tant à cause du mécanisme intime de la contraction musculaire qu'en raison de l'élasticité musculaire. Cette règle ne s'applique que dans une certaine limite car l'extensibilité des muscles n'est pas infinie. Regardons dans le détail ce qui se passe pendant le pédalage, articulation par articulation, muscle par muscle. Nous ne nous intéresserons ici qu'aux muscles mono-articulaires. Les muscles polyarticulaires seront traités plus loin.

7.2.1.1. Les muscles de la hanche

La hanche est toujours fléchie. Les muscles extenseurs mono-articulaires sont donc tous, et en permanence, étirés. Il s'agit du

grand fessier, du carré crural, du grand adducteur et des petit et moyen adducteurs (ces deux derniers ne sont extenseurs qu'en flexion maximale de la hanche). La figure 7.4 montre, par exemple, comment évolue l'étirement de la portion interne du grand adducteur pendant le pédalage. A l'inverse, les muscles fléchisseurs mono-articulaires sont toujours en position raccourcie, moins favorable à leur travail. C'est le cas du moyen fessier, du petit fessier, du psoas iliaque, des petit et moyen adducteurs (fléchisseurs seulement en flexion modérée) et du pectiné.

7.2.1.2. Les muscles du genou

Le genou est lui aussi toujours fléchi. Comme pour la hanche, les trois extenseurs mono-articulaires du quadriceps sont donc en permanence étirés. Les fléchisseurs mono-articulaires sont, par contre, détendus, que ce soit le chef fémoral du biceps crural ou le poplité.

7.2.1.3. Les muscles de la cheville

La cheville est alternativement fléchie et étendue. Si l'on exclut les deux jumeaux, la cheville n'est mue que par des muscles mono-articulaires. En fin de flexion (ou en début d'extension) tous les extenseurs sont étirés : le soléaire du triceps sural, le jambier postérieur, le long fléchisseur commun des orteils, le long fléchisseur propre du gros orteil, le court péronier latéral et le long péronier latéral. En fin d'extension (ou en début de flexion), ce sont les fléchisseurs qui sont étirés : jambier antérieur, extenseur propre du gros orteil, extenseur commun des orteils et péronier antérieur.

7.2.2. LA COURSE

On appelle course d'un muscle la différence de longueur, dans des conditions physiologiques, entre son raccourcissement maximum et son étirement maximum (figure 7.5). Cette course est, par principe pour les muscles mono-articulaires, adaptée aux mouvements de l'articulation desservie. Dans le cas des muscles polyarticulaires, elle est en général insuffisante pour satisfaire la somme des besoins de deux articulations mitoyennes, comme nous l'avons vu au chapitre 5 (en 5.1.2.2). Les muscles sont là pour faire ce qu'on leur demande habituellement de faire. Un entraînement poussé peut ainsi modifier leurs aptitudes, notamment leur capacité de course. Citons l'exemple des danseurs qui sont exercés pour réaliser, d'une manière active, des mouvements souvent hors normes.

Pour illustrer nos propos, nous allons livrer quelques nombres qui porteront sur les courses de trois muscles vedettes du pédalage : le grand fessier, le quadriceps crural et le triceps sural. Attention ! Ce n'est que pour situer un ordre de grandeur. Ce n'est pas à prendre au chiffre.

Le grand fessier est constitué de fibres très longues, jusqu'à 20 cm environ chez l'adulte. Le crural et les deux vastes sont des muscles à texture penniforme (comme nous l'avons vu en 6.3). Leur imposante masse musculaire est organisée pour un mouvement relativement court mais très puissant. Comme les trois chefs mono-articulaires du quadriceps, le triceps sural est conformé pour un mouvement court et puissant, ce dont témoigne sa texture penniforme. La faible course du triceps sural s'explique aussi par la limitation des amplitudes de la cheville.

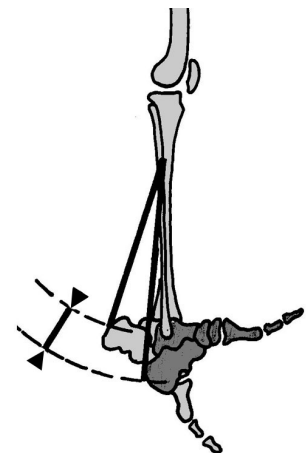


Figure 7.5. La course du soléaire entre son étirement maximum et sa contraction maximale.



Chez Maurice, pendant le pédalage, la course de ces trois muscles essentiels est la suivante :

Grand fessier : à peu près 5 cm.

Composants mono-articulaires du quadriceps crural : pas loin de 3,5 cm.

Triceps sural : 2 cm pour le soléaire et 1,5 cm pour les jumeaux.

Chez les cyclistes, les mouvements du pédalage se déroulent donc avec des amplitudes de course relativement modérées. Les muscles des trois articulations se raccourcissent en n'utilisant qu'un tiers, environ, de leur potentiel. Ces chiffres coïncident, bien évidemment, avec ceux des amplitudes articulaires constatées pendant le pédalage, par rapport aux possibilités des articulations (chapitre 4).

7.2.3. LA FORCE DÉVELOPPÉE

Nous avons vu au chapitre 5 (en 5.1.1.4 : quatrième loi) puis ci-dessus (en 7.1.3) que la force développée est proportionnelle au nombre de fibres musculaires du muscle et donc à sa section fonctionnelle. Plus le muscle est gros, ou épais, plus il est fort. Par exemple, le grand fessier, avec ses 65 cm² de section, environ, est le muscle le plus fort de l'organisme. Le quadriceps crural avec ses 145 cm² de section, environ, constitue, par ses quatre chefs, l'ensemble musculaire le plus fort de l'organisme. On peut évaluer la section de chaque muscle utilisé dans le pédalage, par exemple en se reportant aux quatorze coupes du chapitre 5, et en déduire la force qu'il applique sur chaque articulation.

La figure 7.6 illustre ainsi les forces respectives des grands groupes musculaires (extension et flexion) sur la hanche, le genou et la cheville. On y voit bien la prédominance des extensions de la hanche et du genou.

Une force multipliée par une distance, cela s'appelle un travail. Un travail divisé par un temps cela se nomme une puissance. Pour le grand fessier et le quadriceps, multiplions la surface de section fonctionnelle de ces muscles (proportionnelle à leur force par un même coefficient) par leur course pendant le pédalage. C'est le travail réalisé. Puis divisons les valeurs trouvées par un même temps t . Nous obtenons ainsi la puissance de ces deux muscles qui nous permet de les comparer sur ce critère essentiel. Illustrons cela :

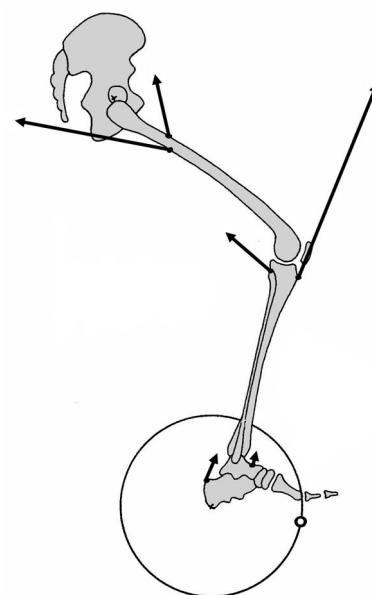


Figure 7.6. Illustration de l'importance relative de la force développée par les groupes musculaires.



Grand fessier : section de 65 cm² et course de 5 cm = 325

Quadriceps : section de 145 cm² et course de 3,5 cm = 507,5

$507,5 / 325 = 1,56$.

L'ensemble du quadriceps est pendant le pédalage 1,6 fois plus puissant que le grand fessier

7.2.4 LE MOMENT DE LA FORCE MUSCULAIRE

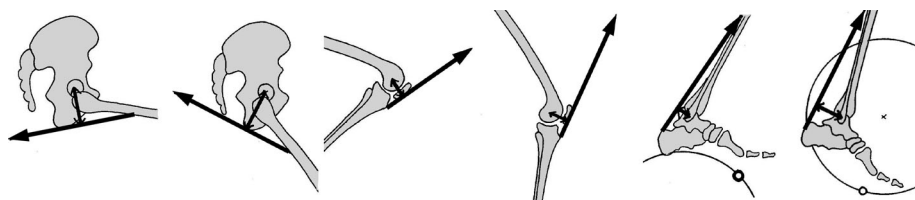
Nous l'avons vu au chapitre 3 (en 3.1.1) le moment d'une force est le produit de cette force par la distance à son point d'appui, mesurée perpendiculairement à la direction de la force. Cette distance est le bras de levier. Pour un muscle agissant sur une articulation, le moment est égal au produit de sa force par la distance de la direction de cette force à l'axe du mouvement de l'articulation. Plus le moment est important, plus l'efficacité mécanique du mouvement est grande. Pour cela, il faut que la direction de la force soit la plus éloignée possible de l'axe de l'articulation. C'est, par exemple, un des rôles que joue la rotule.

Autrement dit, il faut augmenter l'angle de la force par rapport à l'axe du segment osseux qu'elle mobilise. La contraction du muscle réalise cela par augmentation de son volume transversal. Il en va de même de la contraction des muscles sous-jacents, lesquels sont bien souvent synergiques. L'augmentation de la masse musculaire par l'entraînement a le même effet. Plus le muscle est gros, plus il est puissant, plus il est en bonnes conditions pour exercer sa force... mais plus il est lourd, consommateur d'énergie... et peut-être moins élégant.

Pendant le pédalage, voici comment on peut évaluer les bras de levier, en prenant quelques exemples concernant les principaux muscles. Là encore, quelques chiffres seront proposés, à titre indicatif. Ils sont approximatifs et ne concernent que Maurice. Ils ne servent donc qu'à donner un ordre de grandeur.

7.2.4.1. Muscles de la hanche

Les bras de levier des extenseurs de la hanche sont relativement importants. Ils sont plus grands en position de flexion maximale. C'est aussi le moment où les muscles sont le plus étirés. Ils diminuent pendant le mouvement d'extension sauf pour le grand fessier. Les bras de levier des muscles fléchisseurs de la hanche sont eux aussi relativement importants. Ils augmentent lors de la flexion de la hanche alors même que la longueur des muscles, déjà raccourcie, diminue.



Figures 7.7, 7.8, 7.9, 7.10, 7.11 et 7.12. Pendant le pédalage, à force égale, le moment de la force musculaire varie suivant le degré de flexion des articulations car le bras de levier varie. Ce phénomène est particulièrement visible pour l'extension de la cheville par le triceps sural.

7.2.4.2. Muscles du genou

Pendant l'extension du genou, le bras de levier du quadriceps crural augmente légèrement, la rotule s'éloignant de plus en plus de l'axe de flexion-extension du genou. Ce bras de levier est modéré, défavorisant l'action de cet ensemble de muscles si puissant. Le bras de levier des fléchisseurs du genou est lui aussi modéré. Il diminue pendant le mouvement d'extension du genou.

7.2.4.3. Muscles de la cheville

Au niveau de la cheville, le bras de levier du triceps sural reste relativement important à cause du déport arrière de l'insertion du tendon d'Achille sur le calcanéum. Le bras de levier augmente au fur et à mesure de l'extension. Quant au bras de levier des fléchisseurs de la cheville, c'est une misère, misère (partagée par leurs confrères extenseurs accessoires de la cheville). Il ne varie pas pendant le mouvement.

Évaluons dans le tableau ci-dessous, les variations de la longueur du bras de levier (en centimètres) du début à la fin du mouvement, chez Maurice. Nous ne retiendrons ici que des muscles « importants » dans le pédalage, ou faciles à étudier, et représentant à la fois l'extension et la flexion pour chaque articulation. Les propositions de chiffres ne servent qu'à donner un ordre d'idée, répétons-nous. Même si nous ne sommes pas loin de la réalité, il ne faut pas prendre cela pour longueur comptante.

				Début	Fin
	Extenseurs	Hanche	Grand fessier	8	8
			Grand adducteur	6	3,5
			Ischio-jambiers	8,5	6,5
		Genou	Quadriceps crural	4	5
		Cheville	Triceps sural	3	6
	Fléchisseurs	Hanche	Psoas-iliaque	4	5
			Droit antérieur	6	6,5
			Tenseur du fascia lata	5	8
		Genou	Ischio-jambiers	4,5	4
		Cheville	Fléchisseurs	2	2

Nous continuerons en 7.4 notre cheminement cinétique pour voir comment tout cela s'agence. Auparavant, il est nécessaire d'aborder le problème particulier des muscles polyarticulaires.

7.3. CAS DES MUSCLES POLYARTICULAIRES

Neuf muscles poly-articulaires participent aux mouvements de la cheville, du genou ou de la hanche. Les deux jumeaux du triceps sural sont des fléchisseurs très accessoires du genou et des extenseurs efficaces de la cheville. Le droit antérieur du quadriceps crural est un muscle puissant à la fois dans l'extension du genou et la flexion de la hanche. Les trois ischio-jambiers (demi-membraneux, demi-tendineux et chef ischiatique du biceps) sont de très efficaces fléchisseurs du genou et extenseurs de la hanche. Le couturier est un fléchisseur accessoire de la hanche et du genou. Le droit interne est lui aussi un fléchisseur accessoire du genou et, selon son degré de flexion, un fléchisseur ou extenseur confidentiel de la hanche. Le tenseur du fascia lata ne peut être considéré comme un muscle bi-articulaire car son action sur le genou n'est que de principe. Ce muscle est un fléchisseur de la hanche et, comme le grand fessier dont les fibres superficielles s'insèrent également sur le fascia lata, un muscle abducteur de la hanche.

Les seuls muscles poly-articulaires qui jouent un rôle important dans le pédalage sont donc le droit antérieur et les trois ischio-jambiers. Ils ont l'un et les autres, en principe, des actions exactement inverses sur la hanche et le genou.

7.3.1. CONDITIONS DE TRAVAIL

Un muscle est d'autant plus efficace qu'il est étiré au préalable et sa force de contraction diminue au fur et à mesure qu'il se raccourcit, comme nous l'avons évoqué à plusieurs reprises.

À la lumière de ce « théorème » regardons, sur la figure 7.14, l'évolution de la longueur des muscles poly-articulaires pendant le pédalage. Les deux jumeaux (▲) restent quasiment à leur longueur de repos, en étant plutôt raccourcis. Ils ont leur plus grande longueur pendant la phase d'extension de la cheville. Ça tombe bien pour des muscles extenseurs de la cheville. Le droit antérieur (◆) reste, lui aussi, aux alentours de sa taille de repos, tantôt légèrement étiré, tantôt à peine raccourci. Il est plus long pendant la phase de flexion du membre inférieur. Nous verrons plus bas (en 7.6.5) que c'est le muscle du passage critique haut de la révolution de la pédale. Les trois ischio-jambiers (■) fonctionnent de la même manière que le droit antérieur, mais à un autre moment. Ils sont plus étirés pendant l'extension du membre inférieur. Ce sont, entre autres tâches, les muscles du passage critique bas (voir en 7.6.4).

Le couturier (—) et le droit interne (--) sont en permanence raccourcis, jusqu'à près du tiers de leur longueur. Les voilà quasi définitivement hors course, ou du moins sans grand intérêt ! Tout se passe donc bien entre le muscle droit antérieur et les trois muscles ischio-jambiers. D'ailleurs ces muscles sont très développés chez les cyclistes (Voir les coupes anatomiques sur les figures 5.8 à 5.15 du chapitre 5).

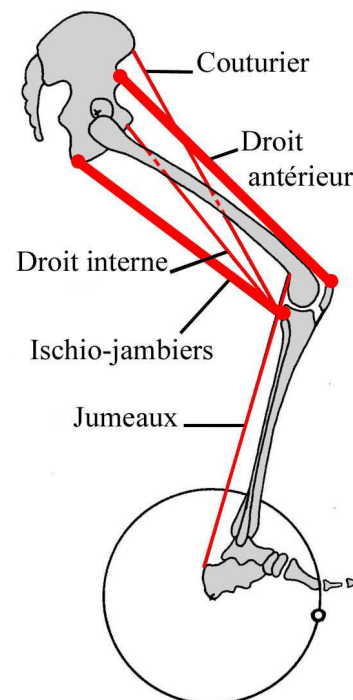


Figure 7.13. Les muscles poly-articulaires du pédalage.

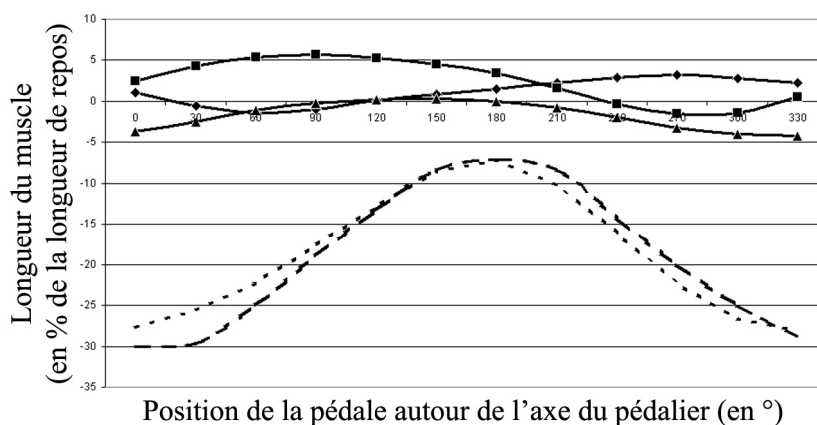


Figure 7.14. Etirement des muscles poly-articulaires pendant le pédalage.

7.3.2. LE TRAVAIL DES MUSCLES POLYARTICULAIRES

7.3.2.1. Allégorie pour pédaleur

Si l'on regarde le pédaleur de profil, projeté sur un plan sagittal, droit antérieur, ischio-jambiers, os iliaque et genou composent un quadrilatère déformable. Un côté est fixe et vertical. C'est le segment qui, sur l'os iliaque, rejoint l'ischion à l'épine iliaque antéro-inférieure. Le côté opposé relie la styloïde du péroné au bord supérieur de la rotule. Le droit antérieur et les ischio-jambiers forment les deux autres côtés. Ceci rappelle le parallélogramme déformable des dérailleurs arrière. Le bassin correspond à la patte de dérailleur du cadre de la bicyclette, la jambe à la chape du dérailleur...

7.3.2.2. Un fonctionnement en partie subi

La longueur des muscles subit la géométrie du pédalage. En effet, la hanche est fixe et l'axe de la pédale suit inexorablement le cercle centré par l'axe de pédalier. Donc, le droit antérieur s'allonge pendant la flexion du membre inférieur et les ischio-jambiers s'étirent pendant l'extension. Heureusement, il y a la cheville pour donner un peu de liberté, à la marge, à ce dispositif. C'est ce que nous verrons au chapitre 8.

7.3.2.3. S'agit-il d'un pantographe ?

Les muscles bi-articulaires de la hanche et du genou ont pour première utilité de lier les mouvements de ces deux articulations. Quand le genou fléchit, la hanche doit fléchir et réciproquement. Dans la marche à pied, le phénomène est évident. Il se reproduit pendant le pédalage, pour la même raison anatomique. Si non nous serions ou marcheur ou cycliste, mais pas les deux. Il y a quand même de légères différences entre la marche à pied et le vélo. Dans le pédalage, les mouvements de flexion et d'extension des articulations sont un peu décalés dans le temps. Le genou a, par exemple, toujours un peu d'avance dans ses mouvements sur la hanche, d'environ 20° sur les 360° de rotation de la pédale. Ce décalage est moins sensible chez le piéton comme nous l'avons vu au chapitre 2 (en 2.2.2). La hanche, le genou et leurs muscles polyarticulaires fonctionnent donc à la manière d'un pantographe. Mais ce n'est pas que cela.

7.3.2.4. Ou de barres d'accouplement ?

Droit antérieur et ischio-jambiers ne sont pas de simples barres d'accouplement. Leurs contractions obéissent à une logique globale du mouvement et ont une utilité. Il n'y a pas de mobilisation en ordre dispersé de chacun des muscles du membre inférieur. Pour analyser ce qui se passe, il faut utiliser plusieurs portes d'entrée et se dire que la vérité est un savant compromis, variable d'un instant à l'autre.

La flexion du genou, sous l'action des ischio-jambiers, tend le droit antérieur et favorise ainsi son action de fléchisseur de la hanche. On peut imaginer que c'est le scénario du début de la flexion. La mise sous tension des ischio-jambiers par flexion de la hanche accroît leur efficacité en tant que fléchisseurs du genou. On peut penser que c'est ainsi que se termine la flexion. L'extension du genou sous l'action du quadriceps favorise l'extension de la hanche par les ischio-jambiers. C'est peut-être le scénario de début d'extension. L'extension de la hanche sous l'action du grand fessier accompagne l'extension du genou. Ce qui empêche le droit antérieur de trop se raccourcir et lui permet de contribuer à l'extension du genou. Etc.

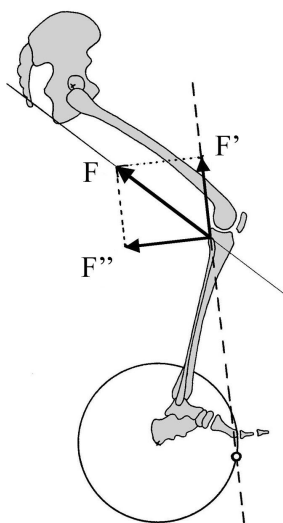


Figure 7.16. Et oui !
Les ischio-jambiers sont aussi
extenseurs du genou.

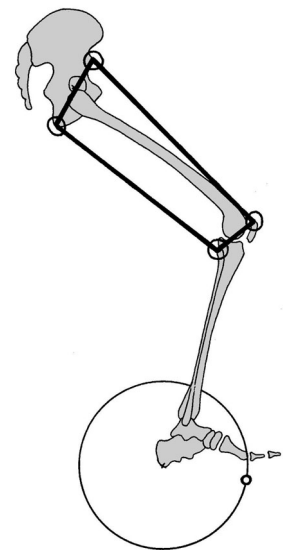


Figure 7.15. Le quadrilatère
déformable du pédalage.

7.3.2.5. La solidarité musculaire

Dans le dernier exemple, on peut dire que le grand fessier est synergique du droit antérieur sur le genou, antagoniste sur la hanche. On considère même qu'il y a transfert de la force d'un muscle puissant de la racine du membre (le grand fessier) sur le mouvement d'une articulation plus distale (le genou) par l'intermédiaire d'un muscle poly-articulaire (le droit antérieur).

Les muscles synergiques et antagonistes se coordonnent. Les contractions isotoniques, qu'elles soient excentriques ou concentriques, et isométriques s'harmonisent. Ce n'est pas du management moderne et technocratique et ça permet donc d'atteindre un objectif : pédaler. Nous allons voir tout de suite à quels paradoxes cela nous mène.

7.3.3. LES ISCHIO-JAMBIERS SONT EXTENSEURS DU GENOU

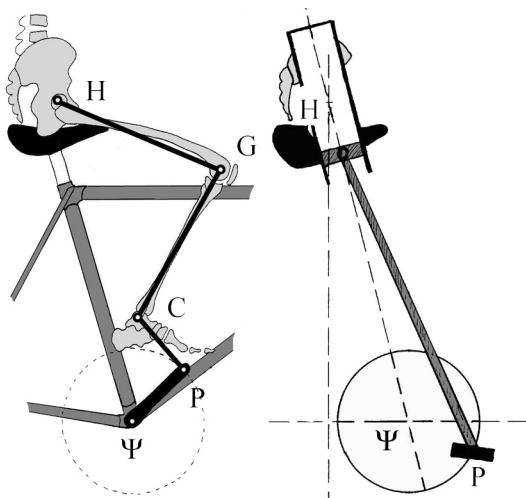
Le pédalage est une alternance d'allongement et de raccourcissement de la distance HP entre la hanche et la pédale.

Dans ce mouvement, H est fixe et P contraint à un parcours immuable. Ce fonctionnement en chaîne articulaire semi-fermée a vraisemblablement des conséquences paradoxales sur le fonctionnement musculaire au niveau de l'articulation intermédiaire du membre inférieur, le genou. Pendant la phase d'extension du membre inférieur, les ischio-jambiers sont sollicités pour l'extension de la hanche. Ce faisant, ils exercent une force sur leurs insertions basses, au niveau de la jambe. Cette force peut être décomposée en deux composantes. La première, F' , est portée par la droite qui relie l'insertion des muscles à l'axe de la pédale. C'est, en synergie avec celle du quadriceps, une force de coaptation de l'articulation fémoro-tibiale. La deuxième, F'' , est perpendiculaire à la première. Elle tend à aligner les trois articulations et donc à étendre le membre inférieur, ce qui est, de toutes manières, inéluctable. Les ischio-jambiers deviennent paradoxalement des auxiliaires de l'extension du genou. Dans cette action probable, ils sont synergiques du quadriceps crural !

7.4. LA FORCE DE PÉDALAGE

Reprenons l'analyse ébauchée au chapitre 1. Nous sommes devant un système mécanique complexe, fonctionnant dans un même plan, avec quatre leviers de longueurs inégales et avec cinq points d'articulation, dont deux fixes et trois mobiles, autour d'axes perpendiculaires au plan de mouvement. Les quatre leviers sont la cuisse, la jambe, l'ensemble pied-chaussure-pédale et la manivelle. Les deux points fixes sont l'articulation de la hanche et l'axe du pédalier. Les trois points mobiles sont les articulations du genou et de la cheville et l'axe de la pédale.

Pour analyser ce système mécanique, nous allons donc procéder en plusieurs temps. D'abord, nous allons simplifier et comparer ce système à un banal moteur à piston, avec bielle et vilebrequin. Nous verrons ensuite que ce modèle est erroné et que le pédalage est plus complexe et intelligent, grâce à la coordination des trois articulations du pédaleur et à un matériel adapté.



Figures 7.17 et 7.18. Comparaison entre les leviers du pédalage et un moteur à piston.

7.4.1. PREMIÈRE ÉBAUCHE DE MODÉLISATION : LE MOTEUR À PISTON

Proposons quelques définitions pour avoir les bons mots et comprendre le modèle proposé : Le cylindre est une « *pièce dans laquelle se meut un piston de moteur* ». Le piston est un « *disque se déplaçant dans le cylindre d'un moteur* ». La bielle est une « *tige rigide, articulée à ses deux extrémités, et destinée à la transmission d'un mouvement entre deux pièces mobiles* ». Le vilebrequin, enfin, est un « *arbre qui transforme un mouvement rectiligne, alternatif, en un mouvement circulaire* ».

Les membres inférieurs du cycliste forment les cylindres, les pistons et les bielles (figures 7.17 et 7.18). L'axe de pédalier, les deux manivelles, et les deux pédales peuvent être assimilés à un vilebrequin.

7.4.2. LA FORCE MOTRICE DANS LE MODÈLE À PISTON

7.4.2.1. La force F_{MI} exercée par le cycliste

La force motrice des membres inférieurs F_{MI} dépend du cycliste, de sa musculature et de sa condition, du braquet qu'il utilise (on abordera ce concept au chapitre 14) et de la force à vaincre (qui fera l'objet des chapitres 10, 11 et 12). Elle dépend aussi, dans une large part, de la position du pédaleur, que nous aborderons au chapitre 8 puis au chapitre 15.

Le cycliste exerce donc, par les mouvements de ses membres inférieurs, une force F_{MI} sur la pédale. Considérons dans un premier temps, dans la logique de notre système simplifié, que F_{MI} est portée par la droite HP (figure 7.19). À son point d'application sur la pédale, la force F_{MI} peut être décomposée en une force F_{MI}' tangente au cercle de rotation de la pédale et une force F_{MI}'' radiale et centrifuge. À la force F_{MI} la pédale oppose une réaction $R_{pédale}$ égale à F_{MI} , portée par la droite HP et de sens inverse. $R_{pédale}$ peut de même se

décomposer en $R_{\text{pédale}}'$ tangente au cercle de rotation de la pédale et $R_{\text{pédale}}''$ radiale, respectivement égales et de sens opposé à F_{MI}' et F_{MI}'' . F_{MI}' représente la force utile pour le pédalage, celle qui fait tourner le pédalier autour de son axe. C'est, *in fine*, la seule force qui nous intéresse avec la force $R_{\text{pédale}}'$ qui représente, au niveau de la pédale, l'ensemble des résistances qui s'opposent à la rotation de la pédale. Nous y reviendrons au chapitre 14.

7.4.2.2. La force utile F_{MI}'

Admettons provisoirement que la force F_{MI} reste constante pendant tout le cycle du pédalage, à l'extension comme à la flexion, ce qui n'est évidemment pas le cas, mais nous allons y revenir. F_{MI}' varie pendant la révolution de la pédale dans une relation à F_{MI} facile à calculer avec les outils de la trigonométrie. F_{MI}' est égale à 0 quand H, P et Ψ sont alignés, c'est-à-dire vers 345° et 165° de rotation de la pédale. F_{MI}'' est alors égale à F_{MI} . F_{MI}' est par contre maximale, et égale à F_{MI} , quand la droite HP est tangente au cercle de rotation de la pédale, c'est-à-dire vers 60° et 270° . Cela dépend de la hauteur et du recul de la selle, et de la longueur des manivelles. Dans l'hypothèse d'une force F_{MI} constante, la figure 7.20 montre (en rouge) comment F_{MI}' évolue au cours du cycle de pédalage.

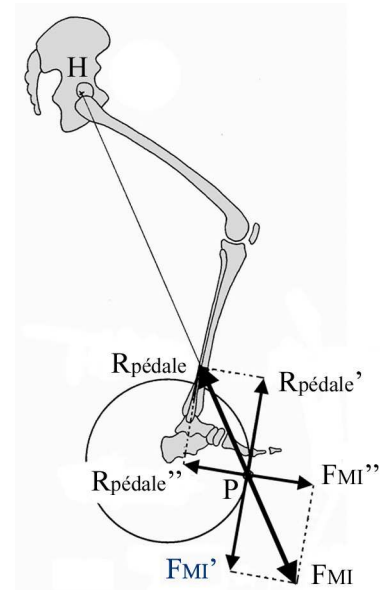


Figure 7.19. Les forces qui s'exercent sur la pédale et la force motrice utile F_{MI}' .

7.4.2.3. La force F_{MI} n'est pas constante

Mais la force F_{MI} n'est évidemment pas constante pendant le cycle de pédalage. Nous en avons exposé les raisons à plusieurs moments dans les chapitres et paragraphes précédents. Reprenons-les en synthèse. Tout d'abord, les muscles de l'extension sont à peu près trois fois plus puissants que les muscles de la flexion. C'est la principale raison. Ensuite, pendant le pédalage, la position des articulations de la hanche et du genou est toujours fléchie, ce qui est favorable à l'extension. En effet, tous les muscles mono-articulaires de l'extension travaillent en position étirée. C'est l'inverse pour les muscles de la flexion. Pour la cheville, le problème est différent puisqu'elle est alternativement en flexion et en extension. L'avantage à l'extension ne concerne qu'une petite moitié de la révolution de la pédale, de 330° à 125° environ. Enfin, les bras de levier des muscles extenseurs sont, en général, plus importants. Ne nous étonnons pas de cette préférence systématique en faveur de l'allongement du membre inférieur. L'homme est d'abord fait pour être debout, du moins dans ce qui est nécessaire à sa survie et les muscles de la station érigée sont les extenseurs.

7.4.2.4. Méthode de correction de la force F_{MI}'

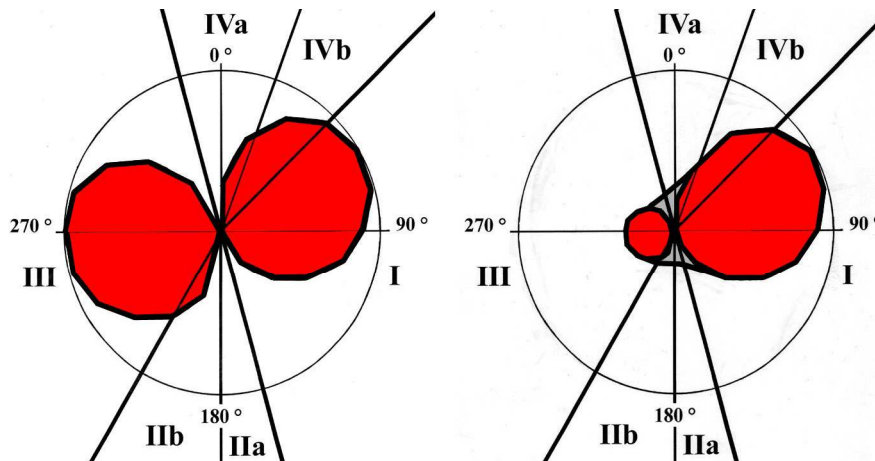
Ne considérons que les gestes utiles pour le pédalage, la flexion et l'extension des trois articulations du membre inférieur. Prenons comme base 1 le mouvement le moins puissant, c'est-à-dire la flexion de la cheville. À partir de cette base, on peut tenter une hiérarchisation des forces développées par chacun des six groupes musculaires. Le classement va être le suivant :

- Sixième et dernier : la flexion de la cheville : 1 point.
- Cinquième : l'extension de la cheville : 5 points.
- Troisièmes *ex æquo*, la flexion de la hanche et du genou : 10 points chacun.
- Premiers *ex æquo*, l'extension de la hanche et l'extension du genou : 30 points chacun.

Au moment où toutes les articulations sont en extension (Phase I), la somme des forces d'extension est affectée du coefficient 65, le plus élevé ($30 + 30 + 5$). La somme des forces de flexion (Phase III) ne dépassera pas le coefficient 21 ($10 + 10 + 1$). Etc. Ceci est bien sûr grossier, approximatif et purement indicatif, mais repose quand même sur toutes les constatations que nous venons de faire.

Déterminons, à partir de ces premiers chiffres, un coefficient correcteur à la force F_{MI} . À chaque point du tour de pédalier, la somme des forces mobilisées sera divisée par 65. Ainsi la force maximale sera égale à 1. Prenons trois exemples : À 15° , le genou est en extension et « vaut » 30, la hanche est encore en flexion et « ne vaut que » 10, la cheville est en flexion et contribue pour 1 au mouvement. $30 + 10 + 1 = 41$. Et $41 / 65 = 0,63$. La force F_{MI}' , à ce point, sera multipliée par 0,63. À 90° , les trois articulations sont en extension. $65 / 65 = 1$.

F_{MI} sera multipliée par 1. À 270° , toutes les articulations sont en flexion. $21/65 = 0.32$. F_{MI} sera multipliée par 0,32. Etc. Et l'on pourrait continuer ainsi en tenant compte du bras de levier, de l'étirement préalable...



Figures 7.20 et 7.21. Evolution de la force motrice utile pendant le cycle du pédalage.
A gauche avant correction, à droite après correction.

La figure 7.21, ci-dessus à droite, élaborée à partir de la figure 7.20 (à gauche) illustre bien (en rouge) la prédominance de l'extension sur la flexion, avec un maximum de force utile F_{MI}' entre 45 et 90° . Il montre aussi la persistance des deux points où la force F_{MI}' est nulle.

7.4.2.5. F_{MI}' nulle

Un des grands problèmes du pédalage est de gommer ces deux passages où la force utile est égale à zéro. Le résultat que le cycliste va chercher à atteindre est illustré sur la figure 7.21, en grisé clair. Nous verrons plus loin, à la fin de ce chapitre et au chapitre suivant, comment le cycliste se débrouille en jouant sur la mobilisation différenciée des trois articulations du même membre inférieur, sur leur absence de synchronisme aux deux points critiques par rapport aux mouvements de flexion et d'extension, et sur la liberté de la cheville. Ce qui rend le pédalage efficace, c'est que les articulations du membre inférieur ne sont pas synchrones mais qu'elles sont parfaitement coordonnées.

7.5. LES MUSCLES EFFECTIVEMENT MIS EN JEU

7.5.1. À PARTIR DES DONNÉES DE L'ANATOMIE

Une bonne connaissance de l'anatomie permet de se faire une idée précise des muscles qui vont être mis en jeu. Il suffit d'un peu de rigueur. Cette démarche est un préalable, avant de se lancer dans des explorations fonctionnelles plus ou moins sophistiquées, voire dans des études expérimentales. Le tableau II ci-dessous récapitule, phase par phase et muscle par muscle, quel muscle est théoriquement susceptible d'être mobilisé et à quel moment. Les muscles polyarticulaires sont signalés en italique. Huit muscles figurent en gras. Ce sont ceux qui feront l'objet d'une analyse particulière, compte tenu de leur importance et de leur relativement facile étude en laboratoire. On notera que les trois ischio-jambiers et le droit antérieur sont quasiment « tout le temps sur le pont », si l'on peut dire.

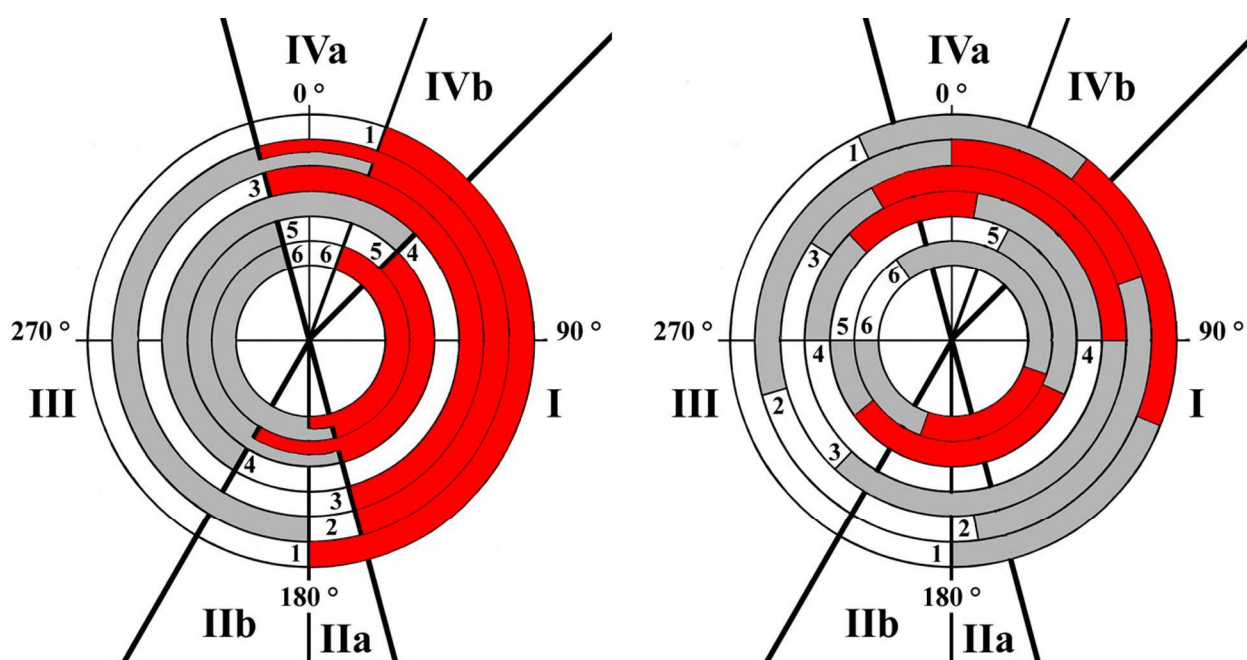
Si l'on reprend ces constats de l'anatomie, on peut les exprimer d'une autre manière, sur la figure 7.22, ci-dessous à gauche. Ce type de graphique est repris à droite (figure 7.23) pour présenter les travaux de laboratoire. On peut ainsi comparer la théorie issue de la rigueur anatomique et les faits expérimentaux.

Nous n'avons retenu ici que les six muscles, ou groupes de muscles, « présélectionnés » dans le précédent tableau : le grand fessier (1) extenseur de la hanche, le droit antérieur (2) extenseur du genou et fléchisseur de la hanche, les vastes interne et externe (3) extenseurs du genou, le jambier antérieur (4) fléchisseur de la cheville, les jumeaux du triceps sural (5) extenseurs de la cheville et fléchisseurs du genou et enfin le biceps fémoral (faisceau bi-articulaire) et le semi-membraneux (6) fléchisseurs du genou et extenseurs de la hanche.

En rouge est illustrée la fonction d'extension, en gris clair celle de flexion. Notons que le droit antérieur est en même temps extenseur du genou et fléchisseur de la hanche pendant la toute la durée de la phase IVa, les deux jumeaux sont simultanément extenseurs de la cheville et fléchisseurs du genou pendant toute la phase II, les deux ischio-jambiers étudiés ici, biceps fémoral et semi-membraneux, sont à la fois fléchisseurs du genou et extenseurs de la hanche sur la durée de la phase IIa.

PHASE	I	IIa	IIb	III	IVa	IVb
MUSCLE MOBILISÉ	45° - 165°	165° - 180°	180° - 210°	210° - 345°	345° - 20°	20° - 45°
Grand fessier	+	+				+
Grand adducteur	+	+				+
Carré crural	+	+				+
Psoas iliaque			+	+	+	
Moyen et petit fessiers			+	+	+	
Tenseur du fascia lata			+	+	+	
Moyen et petit adducteurs			+			+
Pectiné			+	+	+	
<i>Demi-tendineux</i>	+	+	+	+		+
<i>Demi-membraneux</i>	+	+	+	+		+
Biceps fémoral	+	+	+	+		+
Droit antérieur	+		+	+	+	+
Couturier		+	+	+	+	
Droit interne		+	+			+
Vastes interne et externe	+				+	+
Crural	+				+	+
Poplité	+				+	+
Soléaire	+	+	+			
Jumeaux du triceps sural	+	+	+	+		
Autres extenseurs de la cheville	+	+	+			
Jambier antérieur				+	+	+
Autres fléchisseurs de la cheville				+	+	+

Tableau II : Muscles mis en jeu selon la phase du pédalage. Détermination par simple déduction de l'étude anatomique.



Figures 7.22 et 7.23. Les muscles mis en jeu selon la phase du cycle de pédalage. A gauche d'après les déductions anatomiques, à droite d'après les travaux de laboratoire.

7.5.2. DANS UN LABORATOIRE

Il est possible de mettre en évidence l'activité d'un groupe musculaire par la simple observation du mouvement induit. L'extension du genou ne peut être que le fait du quadriceps, en tout ou partie. Mais, en même temps, on peut très bien imaginer que dans le système de chaîne articulaire fermée composé par la cuisse, la jambe, le pied et la manivelle (voir en 7.3.3) le genou puisse s'étendre sans l'intervention du quadriceps, par simple action de la hanche et de la cheville.

Pour identifier l'action d'un seul muscle, les choses sont un peu plus complexes. On y arrive par la détection de l'activité électrique dont le muscle est le siège lorsqu'il est excité, grâce à l'électro-myographie (EMG). Cette technique utilise des électrodes placées à la surface du muscle, sur ou sous la peau, ou même à l'intérieur du muscle. Les différentes études réalisées donnent des résultats variables, ce qui prouve qu'aucune affirmation n'est totalement légitime et que les chercheurs ont encore du travail. Elles confirment cependant l'implication des extenseurs dans l'extension et des fléchisseurs dans la flexion. Ouf ! Elles confirment aussi, et complètent, notre séquençage proposé à partir d'une analyse strictement anatomique de la cinétique du pédalage.

Les huit muscles cités plus haut, sont faciles à étudier en électromyographie. La figure 7.23 montre le consensus entre les différents auteurs (gris foncé) et les résultats divergents (gris clair).

- Pour tous, le **grand fessier** (1) est activé de 40 à 120 ° de rotation de la pédale. Pour quelques auteurs, il est activé dès 350 ° et jusqu'à 180 °. De 350 ° à 20 °, nous sommes encore pendant les derniers moments de la flexion de la hanche. Cette activation paradoxale témoigne probablement d'une synergie avec le droit antérieur pour l'extension du genou et le début du passage critique haut.
- Le consensus sur le **droit antérieur** (2) va de 0 à 70 °. Les valeurs extrêmes vont de 250 à 175 °. Ce muscle est donc bien actif pendant le passage critique haut et comme extenseur du genou. Il intervient probablement aussi, en tant que fléchisseur de la hanche, dans la deuxième partie de la phase III.
- Les deux **vastes interne** et **externe** (3) interviennent de 315-320 ° jusqu'à 90 °, pendant le passage critique haut donc, et au début de la phase d'extension du membre inférieur. Ils sont mis en tension avant le début de l'extension du genou. Ceci est encore un argument pour dire que, décidément, la phase IV est bien dynamique. Il est probable que leur activation s'étend jusqu'à la fin de la phase I, voire plus loin, sans que l'on sache vraiment pourquoi.
- Le **jambier antérieur** (4) est un fléchisseur de la cheville. Il est mobilisé en fin de la phase III de flexion du membre inférieur et probablement jusqu'à la fin de la phase IV.
- Les deux **jumeaux** du triceps sural (5) participent, comme extenseurs de la cheville à une grande partie de la phase I et jouent, à l'évidence, un rôle important dans le passage de la phase critique basse. Ils interviennent encore au début de la phase III, comme fléchisseurs du genou cette fois.
- Enfin le **biceps fémoral** et le **semi-membraneux** (6), à la fois extenseurs de la hanche et fléchisseurs du genou, interviennent surtout pendant la fin de la phase I et le passage critique bas, comme on s'y attendait.

Nous avons maintenant assez d'arguments pour décrire le cycle de pédalage, du point de vue du travail interne, sans grand risque de se tromper ou d'être trop caricatural. Et nous sommes loin du système à piston, bien trop simpliste. Nous y reviendrons au chapitre 8 (en 8.2.6), quand nous étudierons les variantes du pédalage liées au libre jeu de la cheville.

7.6. LES QUATRE TEMPS DU PÉDALAGE

Le pédalage est dû à la succession de deux mouvements des membres inférieurs, l'extension et la flexion. Nous avons vu au chapitre 2 (en 2.2) que l'on pouvait diviser le cycle du pédalage en quatre temps ou phases. La figure 7.24 illustre ces quatre temps. Pour chaque articulation, l'extension y apparaît en gris foncé et la flexion en gris clair.

Quand les trois articulations de la hanche, du genou et de la cheville s'étendent en même temps, on parle de premier temps ou de phase I. Nous avons vu que ce premier temps est le plus efficace, on l'appelle donc aussi temps principal.

Suit un deuxième temps, intermédiaire, pendant lequel les articulations bougent d'une manière dissociée. Le genou amorce sa flexion, puis la hanche et enfin la cheville. C'est la phase II que l'on subdivise en IIa et IIb. Pendant le troisième temps, ou phase III, les trois articulations se fléchissent de concert. Par esprit de symétrie certains parlent encore de temps principal. En réalité, comme nous l'avons vu, seul le premier temps est principal.

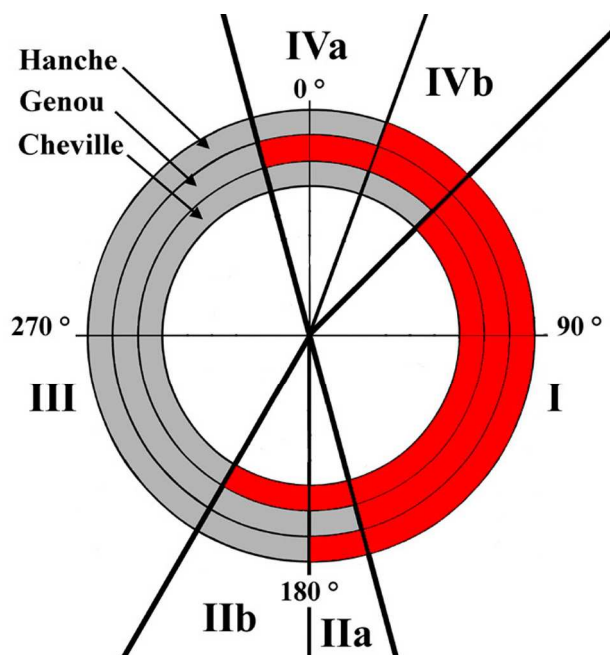


Figure 7.24. Les 4 temps du pédalage. Alternance de l'extension (en rouge) et de la flexion (en gris clair) pour les trois articulations.

Le cycle du pédalage se clôt par un quatrième temps, intermédiaire lui aussi, qui réalise une transition non synchrone vers l'extension des trois articulations dans le même ordre que pendant le deuxième temps. C'est la phase IV, divisée en IVa et IVb.

Les deux temps intermédiaires sont également nommés phases critiques inférieure et supérieure ou encore points morts bas et haut. Pour être exacte, cette dernière dénomination de point mort ne devrait s'appliquer qu'aux seuls deux points de la révolution de la pédale où la composante F_{MI} tangente au cercle est nulle (voir en 7.4.2.2), mais ça ne concerne que le « moteur à piston ». On pourrait aussi parler de point mort pour chaque articulation, ce que nous ferons en 7.6.3. Par rapport au mouvement de pédalage et à son efficacité, les points morts n'existent pas, ou ne devraient pas exister, comme nous allons le voir.

7.6.1. PREMIER TEMPS ANTÉRIEUR ET PRINCIPAL

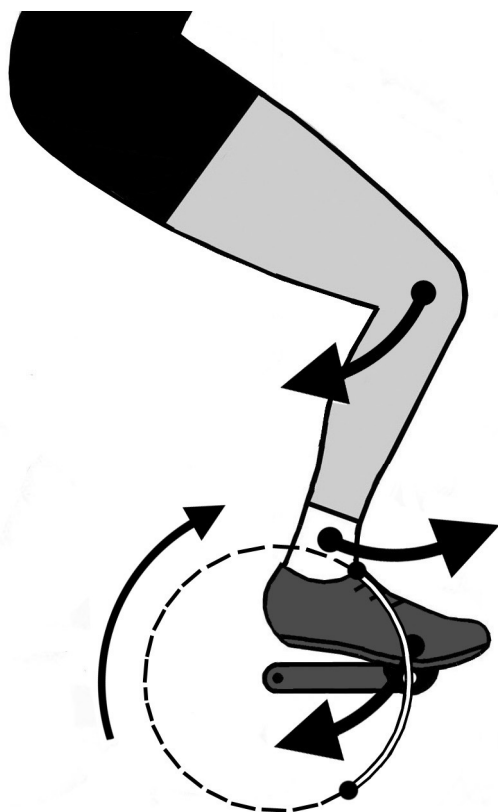


Figure 7.25. Le premier temps antérieur et principal : extension des trois articulations.

Le premier temps est dû à l'extension des trois articulations, qui entraîne la descente de la pédale en avant de l'axe du pédalier. C'est le moment du geste le plus spontané, le plus important et le plus efficace : l'allongement du membre inférieur.

Il mobilise les muscles les plus puissants : grand fessier, grand adducteur, quadriceps crural, ischio-jambiers et triceps sural. Et les muscles mono-articulaires de l'extension travaillent dans des conditions particulièrement favorables car ils sont largement étirés par le mouvement qui précédait et bénéficient, au moins pour les extenseurs de la hanche, de bras de leviers importants. Enfin, les synergies musculaires sont à leur maximum, comme on vient de le voir au paragraphe précédent. Même les fléchisseurs du genou s'y mettent !

C'est encore le moment où le système de pédalage ressemble le plus au moteur à piston évoqué en 7.4.1.

C'est aussi le moment où la force tangentielle F_{MI} au cercle de rotation de la pédale est la plus importante.

Le premier temps du pédalage est surtout efficace à son début, de 45° à 105° environ. Dans cette zone, la hanche est fléchie de 70° à 50°, les extenseurs de la hanche peuvent exercer toute leur puissance. Le genou est fléchi de 100° à 60°, cette zone de travail est très favorable au quadriceps crural et donc à l'extension du genou. Et la cheville est fléchie de 14° à 6°, c'est donc le moment où le triceps sural travaille dans les meilleures conditions.

Pour conclure, il faut bien dire que, par rapport à ce premier temps particulièrement efficace sur le plan moteur, le reste du cycle du pédalage n'est plus tout à fait à la hauteur. Son efficacité est alors toujours nettement inférieure, mais elle reste réelle.

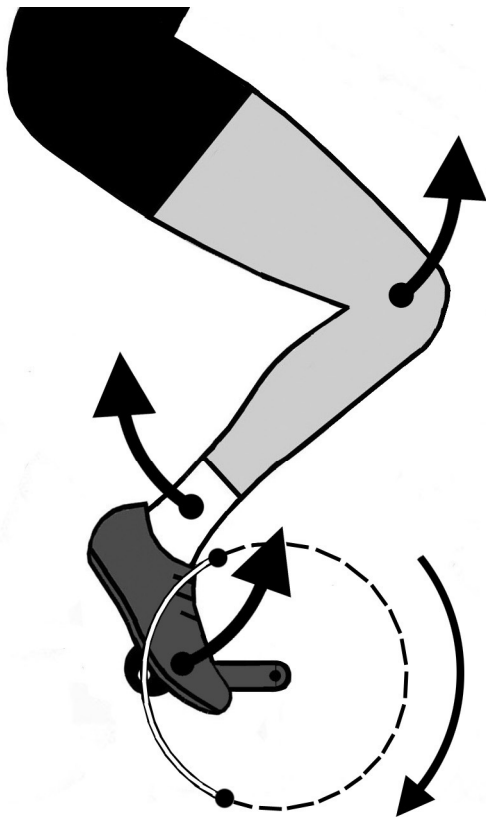


Figure 7.26. Le troisième temps postérieur.
Les trois articulations sont en flexion.

7.6.2. TROISIÈME TEMPS POSTÉRIEUR

C'est le troisième temps du pédalage, celui de la remontée de la pédale en arrière. Il est le résultat, ou la cause, d'un raccourcissement du membre inférieur par flexion des trois articulations.

Cette deuxième phase, dite postérieure, peut n'être que passive, le pied se laissant en quelque sorte remonter par la pédale, entraînée par son homologue controlatérale. Mais le plus souvent la flexion est active. Soit par simple allègement du poids du membre inférieur sur la pédale, c'est le pédalage décontracté du cyclotouriste. Soit en participant activement à la propulsion, c'est le pédalage d'un coureur cycliste ou d'un cyclotouriste dans un col ou contre le vent.

Il est alors nécessaire que le pied soit solidarisé avec la pédale pour permettre cette traction sans déchausser. Le vélo doit donc être équipé de pédales automatiques et les chaussures munies de cales. Au minimum, les pédales doivent être équipées de cale-pied avec des courroies.

La troisième phase du pédalage reste, de toutes manières, beaucoup moins efficace que la phase principale d'extension. Les muscles fléchisseurs sont trois fois moins puissants que les muscles extenseurs, nous l'avons signalé à plusieurs reprises. De plus, ils travaillent presque tous en position raccourcie, peu favorable à l'efficacité musculaire.

7.6.3. INTRODUCTION AUX PHASES CRITIQUES

La phase d'extension ne dure qu'un tiers du cycle de pédalage. La phase postérieure de flexion est un tout petit peu plus longue (voir les chiffres pour Maurice en 2.2.1). Il n'y a donc que les deux tiers du pédalage, environ, qui sont reconnus « officiellement » comme réellement moteurs. Près du tiers de la révolution de la pédale serait donc inefficace ? Que non.

Nous allons examiner tout de suite ce qui se passe aux deux secteurs critiques. Entre la phase principale et la phase postérieure, en bas et en haut de la course de la pédale, se déroulent deux phases intermédiaires pendant lesquelles l'action musculaire semble nulle ou pour le moins réduite. Tout se passe comme si la seule inertie acquise par la rotation du pédalier était responsable de la continuité du mouvement, permettant de passer d'une période active à une autre période active. C'est pourquoi ces deux phases intermédiaires sont souvent dénommées points morts. Il n'en est rien.

D'abord, nous verrons au chapitre 11 (en 11.3.2) que l'énergie cinétique liée au geste de pédalage n'est pas nulle, même si elle n'est pas d'un grand secours.

Ensuite, il paraît plus licite de parler plutôt de la succession de trois points morts, un pour chaque articulation, intervenant au moment où celle-ci passe de la flexion à l'extension et inversement. En fait, lors de ces deux phases « critiques », les points morts de chacune des articulations ne sont pas synchrones et les articulations du membre inférieur sont donc mobilisées d'une manière dissociée. C'est vraisemblablement à cause de cela que l'efficacité du mouvement est réelle. Démonstration !

7.6.4. LE PASSAGE CRITIQUE BAS

Il commence par le début de la flexion du genou, vers 165 ° de rotation de la pédale. Ce point correspondrait, à peu près (voir en 8.1.2.2), à la valeur zéro de la composante de la force d'extension, ou de flexion, du membre inférieur si on était dans un modèle de moteur à piston (7.4.2.1). C'est le début de la phase IIa qui se continue par le passage à la flexion de la hanche (IIb) et se termine avec la fin de l'extension de la cheville.

Les muscles du membre inférieur vont agir pour gommer ce passage réputé difficile, en exerçant sur les articulations, d'une manière isolée ou conjointe, une force motrice qui n'est évidemment plus portée par la droite HP, évoquée en 7.4.2.1. Ils ont d'ailleurs commencé à anticiper ce passage critique dès la fin de la phase I d'extension des trois articulations comme on l'a vu en 7.5.2 et sur la figure 7.23. Ce sont d'abord les muscles de la cheville, aidée par les puissants extenseurs de la hanche qui permettent de passer le point mort bas du genou. Puis les muscles fléchisseurs du genou prennent le relai, aidés par les extenseurs de la cheville (figure 7.27), pour passer le point mort de la hanche, en exerçant une force tangente au cercle de rotation de la pédale. En fin de passage critique bas, les muscles fléchisseurs de la hanche commencent à se mobiliser, alors que la cheville arrive à son point mort (figure 7.28).

Comme dans la phase III, tous ces mouvements ne peuvent être réellement efficaces que si les chaussures du cycliste sont munies de cales ou que si les pédales disposent de cale-pied avec des courroies.

Pour résumer les choses, disons que le mouvement des membres inférieurs, au moment du passage critique bas, ressemble à une ruade ou au déplacement d'une pelleteuse qui ramasse de la terre et que les muscles de la phase intermédiaire basse sont les ischio-jambiers et le triceps sural et qu'ils sont efficaces.

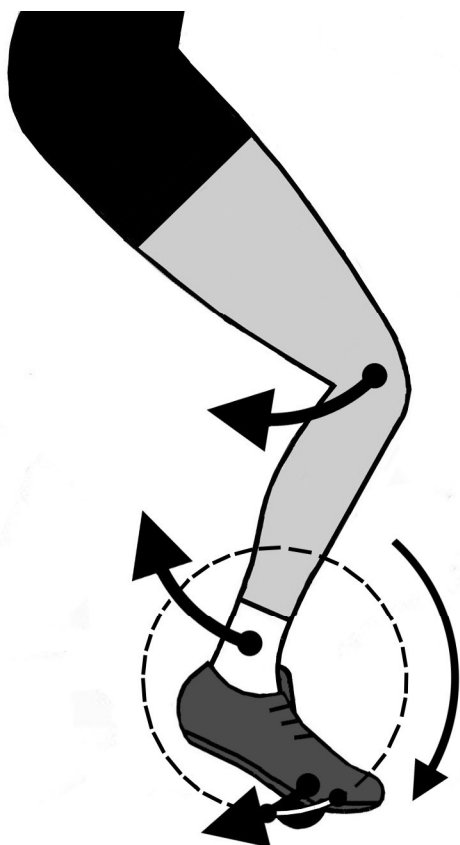


Figure 7.27. Le deuxième temps, partie initiale : le genou passe de l'extension à la flexion.

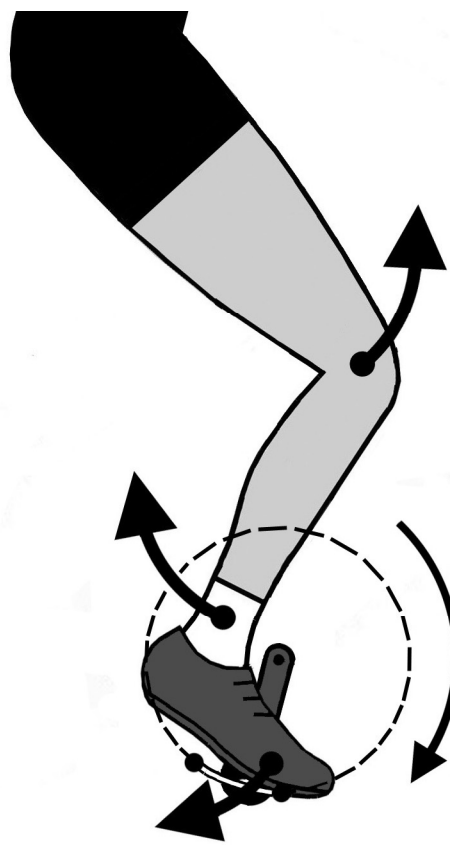


Figure 7.28. Le deuxième temps : partie finale. La hanche passe, elle aussi, de l'extension à la flexion.

7.6.5. LE PASSAGE CRITIQUE HAUT

Il commence par le début de l'extension du genou alors que la hanche et la cheville terminent leur mouvement de flexion. Ce point correspondrait exactement à la valeur zéro de la composante d'extension du membre inférieur si l'on était dans un modèle à piston (voir en 7.4.21 et en 8.1.1).

Cette phase IVa est suivie par la phase IVb durant laquelle genou et hanche sont en extension et la cheville en fin de flexion. La cinétique de ce passage est la même que pour le passage critique bas, mais avec, cette fois-ci, une nette prédominance du rôle du genou et non pas de la cheville.

Le point critique haut du genou est franchi grâce à une petite fin de flexion de la hanche et encore un petit effort des fléchisseurs de la cheville. Dès le début de la phase IVa, l'élasticité musculaire du quadriceps rentre en jeu et l'extension du genou est tout de suite très efficace (figure 7.29). La flexion de la cheville devient quasi passive, servant tout juste à mettre le triceps sous tension pour la phase suivante. Au début de la phase IVb, c'est l'élasticité des extenseurs de la hanche qui rend cette articulation immédiatement utile et très rapidement efficace, pour en arriver au moment fort du pédalage (figure 7.30).

Le mouvement des membres inférieurs ressemble au shoot d'un footballeur. Ou au mouvement d'une pelleuse qui repousse de la terre dans un fossé. Les muscles du passage critique haut sont dominés par un groupe musculaire particulièrement puissant, le quadriceps crural et tout particulièrement le droit antérieur.

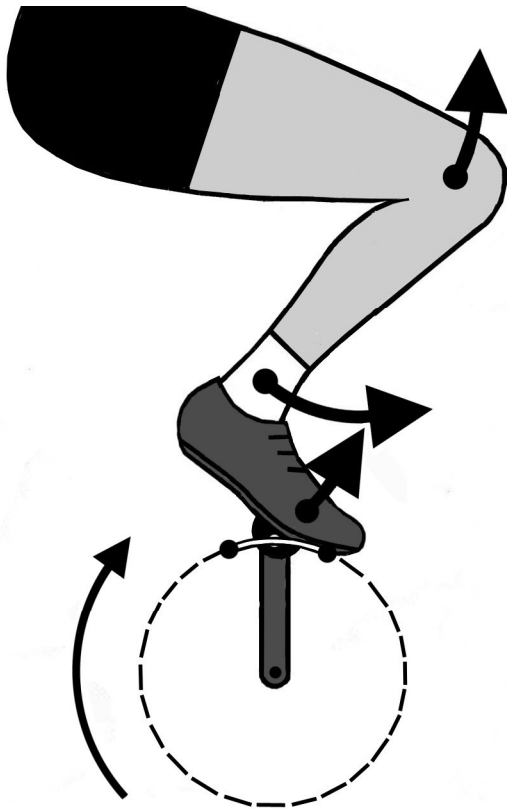


Figure 7.29. Le quatrième temps. Partie initiale.
Le genou passe de la flexion à l'extension.

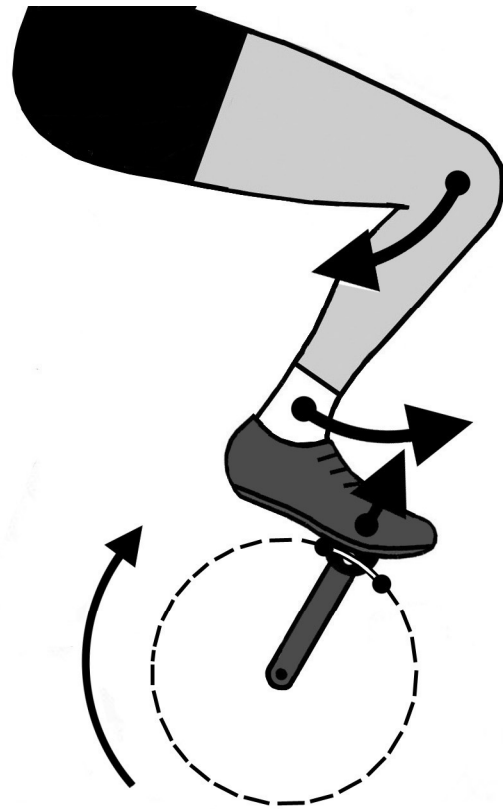


Figure 7.30. Le quatrième temps. Partie finale.
La hanche passe de la flexion à l'extension.

7.6.6. AU TOTAL

Au total, il y a bien quatre phases dans le pédalage.

Leur délimitation est précise si l'on s'en tient aux seuls mouvements des articulations, à la cinématique. C'est celle que nous avons proposée au chapitre 2 (en 2.2).

Du point de vue de la cinétique du pédalage, cette fois-ci, les limites sont plus floues. Les muscles se mobilisent en anticipant d'une phase à l'autre. Il s'agit d'une mécanique complexe, très efficace, mais qui nécessite une parfaite coordination et donc un apprentissage. Nous y reviendrons plus bas en 7.7.3 et à propos de la fréquence de pédalage (en 14.3).

La figure 7.31 (prolongation de la figure 7.21) illustre l'évolution réelle de la force F_{MI} pendant un cycle de pédalage chez un cycliste bien entraîné et expérimenté : La phase antérieure est bien principale et constitue le temps fort d'un cycle de pédalage.

Les trois autres phases sont secondaires mais pas inutiles, bien au contraire, et sont d'une efficacité à peu près équivalente. Il n'y donc définitivement pas de points morts dans le pédalage du cycliste !

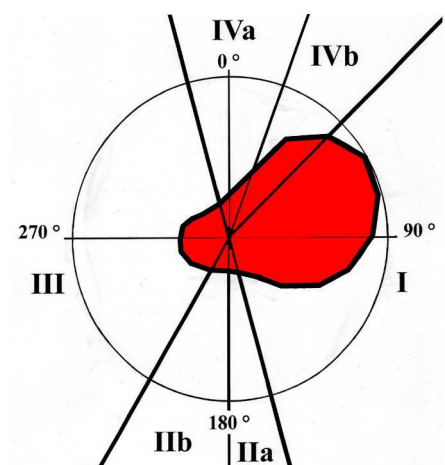


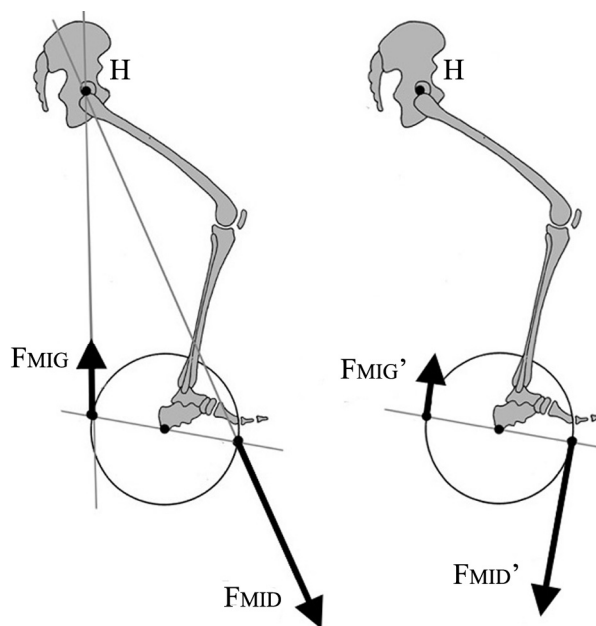
Figure 7.31. Evolution de la force motrice utile pendant un cycle de pédalage chez un cycliste bien entraîné et expérimenté.

7.7. LE PÉDALAGE SE FAIT AVEC DEUX MEMBRES

Jusqu'à ce point, nous n'avons analysé que le pédalage d'un seul membre. Il est temps de constater que le pédalage est bilatéral et que c'est bien utile.

7.7.1. UNE AFFAIRE DE COUPLE ?

Si le pédalage se fait avec les deux membres inférieurs, il n'est cependant pas une simple affaire de couple. En effet, en physique, un couple est un ensemble de deux forces (de même valeur ou non) opposées, ayant des droites d'action parallèles dont le but est de faire tourner l'objet sur lequel il agit. Sur le vilebrequin constitué par le pédalier et les deux pédales, les deux manivelles sont normalement montées en opposition à 180°. Quand l'un des membres inférieurs est en avant, l'autre est en arrière. Mais la force de droite et celle de gauche ne sont pas portées par des droites parallèles puisqu'elles convergent au point H, du moins dans notre modèle simplifié proposé en 7.4.1. Mais, en fait, si on ne considère que la composante utile de la force de pédalage $F_{MI'}$, tangente au cercle de révolution de la pédale, on peut alors légitimement parler de couple.



Figures 7.32 et 7.33. Le couple du pédalage.

7.7.2. LA GESTION À DEUX DES PHASES CRITIQUES

Le tableau III, ci-dessous, montre comment les deux membres inférieurs ne sont pas tout à fait synchrones. Il n'y a pas tout le temps extension de l'un et flexion simultanée de l'autre.

Membre inférieur					Membre inférieur contro-latéral						
Phase	°	H	G	C	Phase	°	H	G	C		
I	45 - 165	Ext	Ext	Ext	III	225 - 345	Flex	Flex	Flex		
IIa	165 –180		Flex		Ext	IVa		345 - 20		Ext	Ext
IIb	180 -210	Flex				Ext	IVb	20 - 45			
III	210 - 345			Flex			Ext	I	45 - 165	Flex	Ext
IVa	345 - 20	Ext	Flex		IIa	165 - 180		Flex	Flex		
IVb	20 - 45				Ext	Ext					
					III	210 - 225					

Tableau III : Mise en évidence des imperfections utiles du synchronisme des articulations des deux membres inférieurs.

Par exemple, entre 180 et 200° de rotation de la pédale droite et 0 à 20° de la pédale gauche, la hanche droite est déjà en flexion alors que la hanche gauche est encore en flexion. De même, entre 210 et 225°, et entre 30 et 45° pour le membre contro-latéral, les deux chevilles sont en mouvement de flexion. On notera que ces moments sont brefs, qu'ils ne concernent que la flexion et ne sont situés que dans les deux phases critiques basse et haute. Pendant la phase antérieure principale et la phase postérieure (I et III) il y a une véritable complémentarité des deux membres inférieurs.

Les deux points morts du genou sont synchrones, ce qui ne facilite pas leur passage. Les mouvements des deux autres articulations vont cependant s'additionner. Soit F la somme des forces utiles sur les deux pédales développées par les deux membres inférieurs, F_D à droite + F_G à gauche.

La force F est illustrée sur la figure 7.34 ci-dessous à gauche, en grisé. La figure 7.35 ci-dessous à droite est la « somme » des actions musculaire des deux membres inférieurs, effectuée à partir de la figure 7.23 (résultats des travaux en laboratoire, en ne retenant que les mobilisations musculaires faisant consensus). Il montre qu'il y a toujours un muscle en action, soit d'un coté, soit de l'autre.

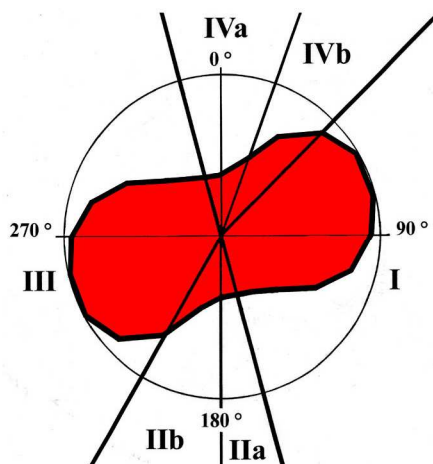


Figure 7.34. Importance de la force utile pendant le pédalage avec les deux membres inférieurs.

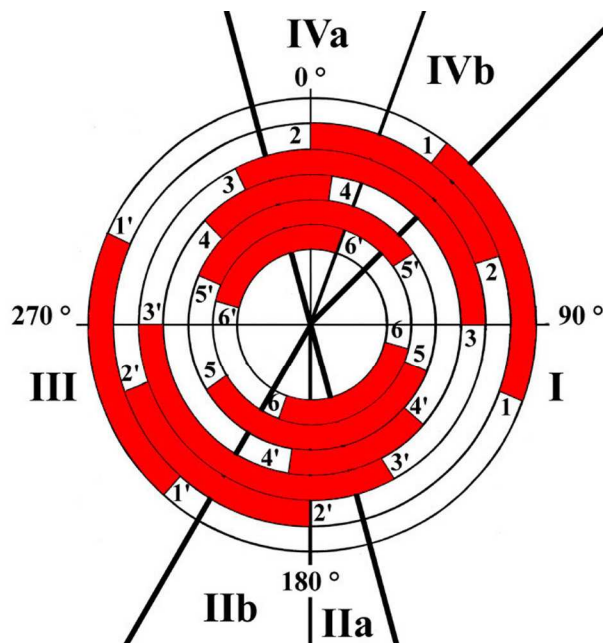


Figure 7.35. Les muscles mis en jeu dans le pédalage. Il y en a toujours au moins un, à gauche ou à droite.

Rappelons (pour la figure 7.35) que les six muscles, ou groupes de muscles, « sélectionnés » sont le grand fessier (1) extenseur de la hanche, le droit antérieur (2) extenseur du genou et fléchisseur de la hanche, les vastes interne et externe (3) extenseurs du genou, le jambier antérieur (4) fléchisseur de la cheville, les jumeaux du triceps sural (5) extenseurs de la cheville et fléchisseurs du genou et enfin le biceps fémoral (faisceau bi-articulaire) et le semi-membraneux (6) fléchisseurs du genou et extenseurs de la hanche.

7.7.3. DE LA NÉCESSITÉ DE L'APPRENTISSAGE DU PÉDALAGE

En résumant d'une manière caricaturale, on peut affirmer que l'homme et la femme ne font partie de l'espèce humaine que depuis qu'ils sont devenus bipèdes, c'est-à-dire après avoir adopté la station et la locomotion debout. La marche sur deux membres, dits alors inférieurs et non plus postérieurs, est innée chez l'être humain du troisième millénaire après Jésus-Christ. La bicyclette n'a pas encore deux siècles, elle est d'utilisation récente et le pédalage n'est pas encore inné. Cela viendra, n'en doutons pas. Mais avant que nos enfants portent le gène, il faut bien que nous réalisons un apprentissage des gestes du cycliste.

La configuration anatomique de l'être humain, notamment en ce qui concerne les articulations des membres inférieurs et les muscles bi-articulaires communs à la hanche et au genou, prédispose aux mouvements de pédalage, c'est ce que nous venons de voir. Mais la mobilisation des muscles du pédalage est complexe. Il faut un minimum de temps et d'effort pour développer les muscles utiles. Il est surtout indispensable d'apprendre à gérer de la manière la plus efficace et la plus économique le jeu des muscles synergiques et antagonistes. Voici un des buts de l'entraînement au sport cycliste.

Jacques ANQUETIL, par ses dons et son travail, avait approché la perfection d'un geste fluide, harmonieux, totalement dédié à l'effort à fournir, sans mouvements parasites. Il était beau et impressionnant. Quarante ans plus tard, lors de son retour à la compétition, Lance ARMSTRONG fait une démonstration éblouissante de l'utilité de l'apprentissage technique de la gestuelle propre aux vélodipédistes, par sa capacité à utiliser des fréquences élevées de pédalage, en danseuse ou en montagne. Nous reviendrons sur ce sujet, à propos de la fréquence de pédalage, au chapitre 14.