

# Chapitre 2. CINÉMATIQUE DU PÉDALAGE

« Cinématique : Emprunt scientifique au grec kinêmatikos, dérivé de kinêma = mouvement. C'est la partie de la mécanique qui étudie le mouvement indépendamment des forces qui les produisent. La cinématique est complétée par la cinétique qui est la branche de la mécanique qui étudie la relation entre les forces appliquées et la cinématique des corps et des systèmes ». Le dictionnaire ROBERT.

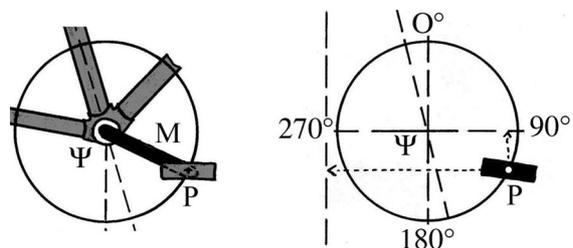
## 2.1. LES MOUVEMENTS OBSERVÉS

Les mouvements que nous allons observer sont un peu caricaturés, pour être démonstratifs. Ce sont les gestes de Maurice, dont nous avons fait connaissance au chapitre précédent. Ils ont été saisis pour vous les présenter et réfléchir dessus. Nous verrons aux chapitres 13, 14 et 15 comment faire le lien avec une pratique de cycliste avide de bonnes sensations.

A partir de maintenant, nous allons observer et étudier les mouvements des différents segments du membre inférieur en référence à la position de la pédale sur sa circonférence de révolution. Nous regarderons d'abord les mouvements du pied, puis ceux du gros orteil, enfin ceux des axes de flexion-extension de la cheville, du genou et de la hanche. Nous ferons ensuite une synthèse permettant de caractériser différentes phases pendant le pédalage. Nos constatations seront illustrées par des schémas, comme ci-dessous, qui sont un regard sur le cycliste et son vélo, centré et agrandi éventuellement sur ce qui paraît important, l'observateur étant situé à droite du cycliste et son regard étant perpendiculaire au plan sagittal du vélo. Nous utiliserons aussi des graphiques quand ce sera nécessaire ou plus parlant.

### 2.1.1. LA ROTATION DE LA PÉDALE

La pédale parcourt la circonférence d'un cercle centré sur l'axe de pédalier  $\Psi$  et de rayon égal à la longueur  $M$  de la manivelle. Quand elle est au point haut, à la verticale de l'axe de pédalier, on dit qu'elle est au point  $0^\circ$ . Si on regarde le cycliste de sa droite, la rotation de la pédale se fait dans le sens des aiguilles d'une montre.  $90^\circ$  représente le point le plus en avant,  $180^\circ$  le point déclive et  $270^\circ$  le point le plus en arrière. À l'inverse, si l'observateur se place à gauche du pédaleur, la rotation s'effectue dans le sens inverse des aiguilles d'une montre.



Figures 2.1 et 2.2. Le cercle de révolution de la pédale et le système de référence sur la circonférence parcourue.

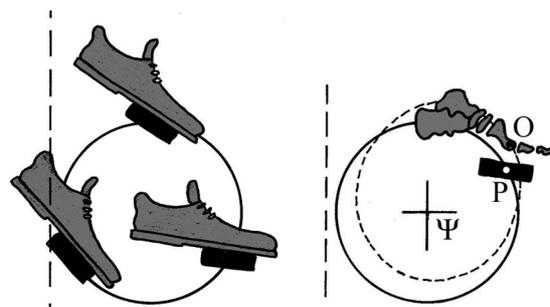
### 2.1.2. LES MOUVEMENTS DU PIED

#### 2.1.2.1. L'inclinaison du pied

Pendant le pédalage, l'inclinaison du pied varie. Le talon est toujours plus haut que l'avant du pied et la différence de hauteur est plus importante pendant la remontée de la pédale que pendant la descente.



Pour Maurice, l'inclinaison maximale, de  $55^\circ$  par rapport à l'horizontale, se produit un peu après les  $3/4$  de la rotation de la pédale. L'inclinaison minimale, de  $5^\circ$ , se produit un peu après  $90^\circ$  de rotation de la pédale.



Figures 2.3 et 2.4. L'inclinaison du pied et la révolution du gros orteil pendant le pédalage

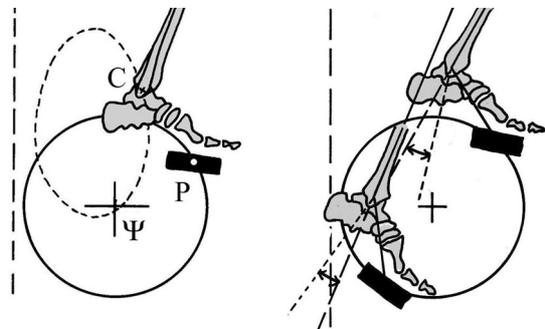
### 2.1.2.2. La révolution du gros orteil

L'articulation métatarso-phalangienne du gros orteil (axe de flexion-extension O du gros orteil) est à l'aplomb de l'axe de la pédale, sur la perpendiculaire au plan de la pédale passant par cet axe. Le point O décrit une courbe ovoïde, un peu décalée en haut et en avant par rapport au cercle de révolution de la pédale.

### 2.1.3. LES MOUVEMENTS DE LA CHEVILLE

#### 2.1.3.1. L'œuf de la cheville

L'axe de flexion-extension de la cheville C suit un mouvement qui s'inscrit dans une forme d'œuf presque parfaite, en arrière et en dessus de l'axe de pédalier. Cette ovalisation du mouvement de rotation a pour effet de diminuer les distances parcourues. Pendant un tour complet du pédalier, l'axe de la pédale P a parcouru 1068 mm (avec des manivelles de 170 mm), le point O environ 1000 mm (94 % de la distance parcourue par P) et le point C seulement un peu plus de 900 mm (84 % de P).



Figures 2.5 et 2.6. La révolution ovoïde de la cheville et les amplitudes de flexion et d'extension de l'articulation.

#### 2.1.3.2. La mobilité de la cheville

A 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. A l'inverse, l'extension de la cheville tend à placer le pied dans le prolongement de la jambe. Pendant le tour de pédalier, la cheville s'étend (diminue sa flexion ou augmente son extension) et se fléchit (diminue son extension ou augmente sa flexion) alternativement. Le mouvement d'extension a plutôt lieu pendant la phase antérieure de descente de la pédale alors que le mouvement de flexion a lieu pendant la phase postérieure de remontée. Nous verrons les contraintes anatomiques de ces mouvements de la cheville au chapitre 4 (en 4.2.2).



Pendant le pédalage, le maximum de flexion de la cheville est d'une quinzaine de degrés. Il est atteint au 1<sup>er</sup> huitième du tour de pédalier. Le maximum d'extension est lui aussi d'une quinzaine de degré. Il est atteint vers 210° de rotation du pédalier.

### 2.1.4. LES MOUVEMENTS DU GENOU

Le genou, réduit à son axe transversal G, suit un mouvement de balancement sur un arc de cercle centré sur la hanche H, de rayon égal à la longueur fonctionnelle du fémur HG. Cet arc de cercle se déroule sur une quarantaine de degrés. Pendant un tour complet du pédalier, le genou parcourt, en un aller-retour sur son arc de cercle, environ 2/3 de la distance parcourue par la pédale et à peu près les 3/4 de celle de la cheville.

La flexion du genou est le mouvement qui rapproche la face postérieure de la jambe (le mollet) de la face postérieure de la cuisse. À l'inverse, l'extension est le mouvement qui éloigne le mollet de la face postérieure de la cuisse. Dans l'oscillation du pédalage le mouvement du genou est donc alternativement de flexion et d'extension. Il ne faut pas confondre mouvement et position. Quand on pédale la position du genou est toujours fléchie par rapport à la position de référence dans laquelle la jambe est dans le prolongement de la cuisse (nous verrons cela au chapitre 4).

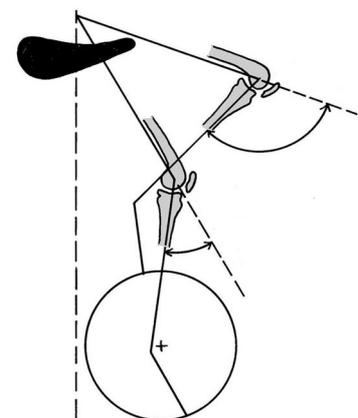


Figure 2.7. Les mouvements du genou. Flexion maximale en position haute de la pédale et flexion minimale en position basse.



Pendant le pédalage, la flexion du genou oscille entre un maximum d'environ 115° et un minimum d'à peu près 40°.

## 2.1.5. LES MOUVEMENTS DE LA HANCHE

Pendant le pédalage, la position du centre fonctionnel de l'articulation de la hanche est, théoriquement ou du moins d'une manière souhaitable, fixe et immobile, liée à la stabilité de la position du bassin sur la selle.

La flexion de la hanche se définit comme le mouvement qui porte la face antérieure de la cuisse à la rencontre du tronc. L'extension de la hanche porte la cuisse en arrière du plan frontal du tronc. Dans l'action de pédalage, la hanche est, comme le genou, toujours en position fléchie. Son mouvement est alternativement de flexion quand l'angle entre la cuisse et l'axe vertical du bassin augmente et d'extension quand celui-ci diminue. Cette extension éloigne alors la face antérieure de la cuisse du tronc.



Pendant le pédalage, les amplitudes de flexion de la hanche varient de 25-30° à 70-75°.

Le point H se trouve juste à l'aplomb du point  $\omega$ .

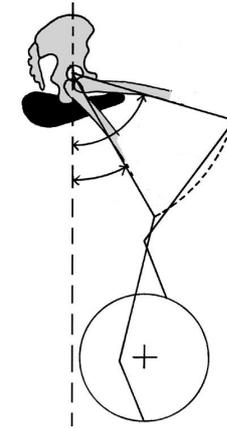


Figure 2.8. Les mouvements de la hanche. Flexion maximale en position haute de la pédale et flexion minimale en position basse.

## 2.2. SÉQUENÇAGE DU PÉDALAGE EN QUATRE TEMPS

Ce qui marque le temps pendant le cycle du pédalage, c'est l'alternance entre les phases d'extension et de flexion des trois articulations du membre inférieur. Or, le passage d'un mouvement à l'autre ne se produit pas au même instant pour la cheville, le genou et la hanche, comme on vient de le voir. Qu'on en juge :



Voici ce que nous avons constaté pendant le pédalage de Maurice :

Passage de la flexion à l'extension :

- Genou : vers 345°
- Hanche : vers 20°
- Cheville : vers 45°

Passage de l'extension à la flexion :

- Genou : vers 165°
- Hanche : vers 180°
- Cheville : vers 210°

### 2.2.1. QUATRE PHASES

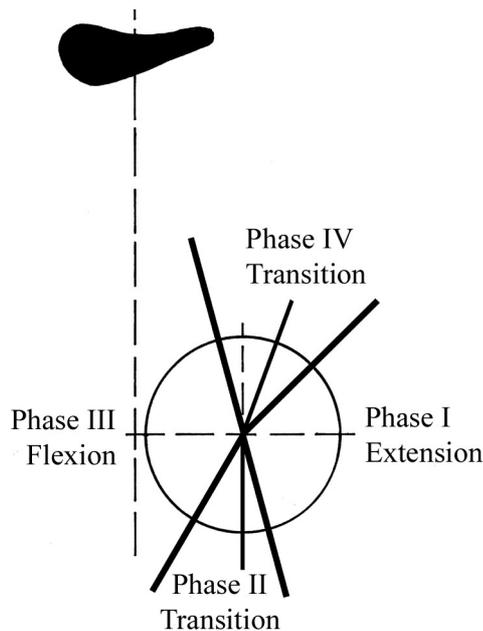


Figure 2.9. Mise en évidence graphique des quatres phases du pédalage.

Il n'y a donc pas deux phases alternatives pendant un tour de pédalier mais deux phases d'extension et de flexion des trois articulations en même temps, séparées par deux phases intermédiaires, de transition.

Le premier temps (Phase I) correspond à l'extension de concert des trois articulations. La pédale est en avant.

Le deuxième temps (Phase II) assure le passage entre l'extension et la flexion de l'ensemble des trois articulations. La pédale est en bas. On peut le diviser en deux moments : Pendant la phase IIa, seul le genou est déjà en flexion. Au cours de la phase IIb, la hanche est aussi passée à la flexion.

Le troisième temps (Phase III) est celui de la flexion des trois articulations. C'est la phase la plus longue. La pédale est en arrière.

Le quatrième temps (Phase IV) réalise la transition entre la flexion et l'extension de l'ensemble des trois articulations. La pédale est en haut. On peut lui aussi le diviser en deux segments : Pendant la phase IVa, que le genou est le seul à être déjà en extension. Pendant la phase IVb, la cheville termine seule son mouvement de flexion.

Les positions de la pédale relevées pour Maurice sont les suivantes :				
	Phase I	45 ° à 165 °	33,3 % du tour de pédalier	
	Phase II {	II a	165 ° à 180 °	} 12,5 % du tour du pédalier
		II b	180 ° à 210 °	
	Phase III	210 ° à 345 °	37,5 % du tour du pédalier	
Phase IV {	IV a	345 ° à 20 °	} 16,7 % du tour du pédalier	
	IV b	20 ° à 45 °		

La figure 2.10 montre le degré de flexion ou d'extension de chaque articulation (cheville ▲, genou ■, hanche ◆) selon le point de révolution de la pédale autour de l'axe du pédalier. La description porte sur le membre inférieur droit, commence et finit au moment où la pédale droite passe le point culminant (0 °) de sa révolution autour de l'axe du pédalier.

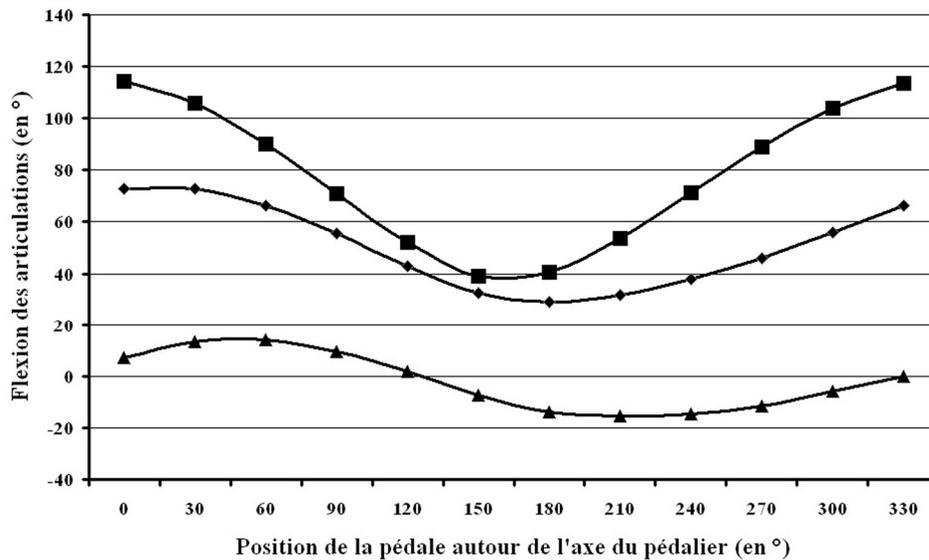


Figure 2.10. Flexion ou extension des articulations du membre inférieur pendant le pédalage.

## 2.2.2. COMPARAISON VÉLO ET MARCHÉ

Pour clore ce paragraphe, il est instructif de comparer les mouvements articulaires dans deux activités physiques, le vélo et la marche (figures 2.10 et 2.11).

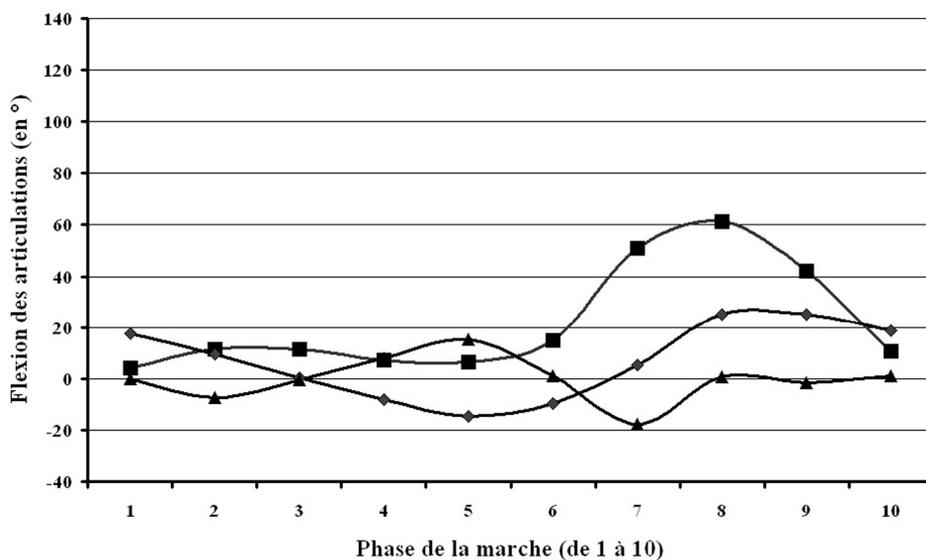


Figure 2.11. Flexion ou extension des trois articulations du membre inférieur pendant la marche.

Les exemples proposés, sur les figures 2.10 et 2.11, concernent un cycle de chaque activité. Ce sont un tour de pédalier pour le cycliste, une foulée pour le marcheur. Ils concernent la cheville, le genou et la hanche. Pour la marche, comme pour le pédalage, la description porte sur le membre inférieur droit. Elle commence et finit au début de la phase d'appui du membre, c'est à dire au moment où le talon droit porté en avant prend contact avec le sol et se termine quand le même talon reprend contact avec le sol. Le cycle de marche est ensuite divisé en 10 parts égales dans le temps.

On peut déjà noter que le mouvement de la marche est moins simple que celui du pédalage et est, probablement, plus difficile à analyser. Enfin, sans contestation possible, les amplitudes de flexion des articulations sont plus faibles que dans le pédalage. On pourrait faire la même chose pour la marche de compétition, la course à pied ou la montée d'un escalier. Je vous propose de méditer sur les différences exposées dans les deux figures, tout en pédalant ou en marchant. Nous y reviendrons dans le détail, dans un chapitre 17, d'appendice, une fois que nous aurons toutes les données en main, pour montrer comment le cycliste est très probablement un « piéton miraculé ».

## 2.3. RAPPELS DE MÉCANIQUE : LE MOUVEMENT

La mécanique est la science du mouvement et de l'équilibre des corps. C'est également la science de la construction et du fonctionnement des machines. Par déduction, la biomécanique est la discipline qui étudie les structures et les fonctions physiologiques des organismes en relation avec les lois de la mécanique. En décrivant le cycliste, sa machine et les mouvements de pédalage, nous venons de faire de la biomécanique, et plus précisément de la cinématique. Avant d'aller plus loin, il est nécessaire de faire un premier retour sur les concepts de la mécanique que nous avons utilisés. Nous les compléterons et les approfondirons, au fur et à mesure que nous en aurons besoin, pour éclairer et bien comprendre les conséquences de nos descriptions ou observations anatomiques et physiologiques.

### 2.3.1. PRINCIPAUX MOUVEMENTS

Le mouvement est un changement de position dans l'espace en fonction du temps, par rapport à un système de référence, nous l'avons évoqué au chapitre un.

#### 2.3.1.1. Mouvement linéaire de translation

Un mouvement linéaire nous conduit d'un point à un autre en ligne droite. C'est un mouvement de translation pendant lequel tous les points du segment ou du corps parcourent la même distance. Le cycliste sur son vélo avance en ligne droite, du moins pour simplifier. Quand il participe à l'étape Pau - Luchon du Tour de France, il fait de même.



Quand Maurice va chez son boulanger chercher les croissants du dimanche matin, on peut dire qu'il effectue un mouvement de translation linéaire.

#### 2.3.1.2. Mouvement angulaire de rotation

Le mouvement angulaire est un mouvement de rotation autour d'un axe. Tous les points du segment mobilisé parcourent le même angle. Par exemple, le mouvement des manivelles est un mouvement angulaire de rotation de  $360^\circ$  autour de l'axe de pédalier. Mais tous les points n'ont pas parcouru la même distance.



Pendant la phase d'extension du membre inférieur de Maurice, le mouvement de la cuisse est un mouvement angulaire de  $45^\circ$  autour de l'axe de flexion-extension de la hanche. L'extrémité inférieure de son fémur a parcouru une trajectoire d'environ 35 cm et le petit trochanter d'à peine 5 cm.

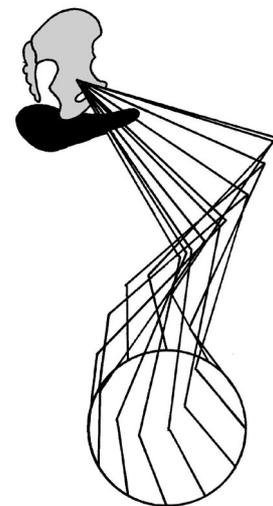


Figure 2.12. Kinogramme illustrant les mouvements des trois segments du membre inférieur.

### 2.3.1.3. Mouvement plan général

Ce n'est ni une translation, ni une rotation mais la combinaison des deux. Tous les points du segment se déplacent dans des plans parallèles entre eux. Par exemple, le mouvement de la jambe est, pendant le pédalage, un mouvement plan général, dans le plan sagittal de pédalage, tout comme le mouvement du pied, comme le montre le kinogramme de la figure 2.12.

### 2.3.1.4. Transformation de mouvements angulaires en un mouvement linéaire

Le cycliste fait avancer son vélo en effectuant des mouvements angulaires de flexion et d'extension de la hanche, du genou et de la cheville, de rotation de la pédale autour de son axe, du pédalier autour de l'axe de pédalier. Tous ces mouvements angulaires sont transmis par la chaîne aux pignons de la roue libre, et entraînent la roue arrière, dans un mouvement également angulaire. Ces mouvements du cycliste et de sa machine se transforment en un mouvement linéaire de propulsion du couple homme - machine. Nous verrons comment plus loin, au chapitre 14.

### 2.3.1.5. Trajectoire d'un point

La trajectoire d'un point est la courbe géométrique décrite au cours du temps par les positions successives de ce point dans l'espace servant de référence. Prenons un vélo en translation rectiligne et regardons les trajectoires de trois points : A un point de la bande de roulement du pneu avant, B le raccord haut de direction et P l'axe de la pédale.

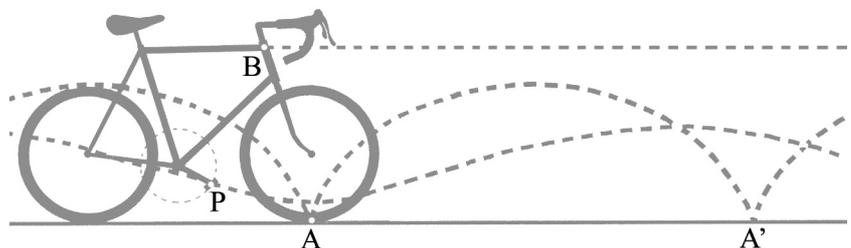


Figure 2.13. Trajectoires suivies par différents points du vélo : un point A de la bande de roulement du pneu avant, un point B du cadre et l'axe de la pédale droite.

Le point A décrit, par rapport au sol, une trajectoire cycloïde d'amplitude verticale égale au diamètre de la roue et de « période » horizontale AA' égale à la circonférence de la roue. Par rapport à l'axe du moyeu de la roue, le point A suit une trajectoire circulaire.

Le point B suit une trajectoire rectiligne parallèle à la surface de la route, comme tous les points du cadre.

Le point P suit une trajectoire circulaire autour de l'axe du pédalier et une trajectoire presque sinusoïdale par rapport au sol, d'amplitude verticale égale à 2 fois la longueur des manivelles et de « longueur d'onde » horizontale égale, par définition, au développement (voir en 14.1.1.2).

## 2.3.2. LA VITESSE

### 2.3.2.1. Vitesse linéaire : $v = d / t$

La vitesse est la distance parcourue par unité de temps. Soit  $v$  la vitesse,  $d$  la distance et  $t$  le temps. Dans le cas d'une vitesse linéaire, on l'exprime par exemple en mètres par seconde (m/s) ou en km/h.

Notons que  $v$  (m/s) =  $v$  (km/h) / 3,6.



Maurice roule à 22,5 km/h ou 6,25 m/s en vitesse de croisière. C'est une vitesse moyenne et la vitesse instantanée varie, passant par exemple de 10 km/h pendant la montée d'un raidillon, à 60 km/h pendant une descente rapide.

### 2.3.2.2. Vitesse angulaire : $\omega = \alpha / t$

On procède de la même manière pour définir la vitesse angulaire  $\omega$  et on parlera d'angle  $\alpha$  parcouru par unité de temps  $t$ . La vitesse angulaire sera exprimée en radians par seconde ou en degrés par seconde (1 radian =  $360^\circ / 2\pi$ ) ou en tours par minute.



Kevin « mouline » à 90 tours de pédalier/mn. La vitesse angulaire de la pédale est de  $540^\circ/s$ . Les vitesses angulaires moyennes sont de  $90^\circ/s$  pour la cheville,  $230^\circ/s$  pour le genou et  $134^\circ/s$  pour la hanche.



Maurice tourne les manivelles à une vitesse de 77 tours de pédalier par minute. La vitesse angulaire de la pédale, par rapport à l'axe de pédalier, est de  $77 \times 360 = 27.720^\circ$  par minute, soit  $462^\circ$  par seconde, soit 8,06 radians par seconde. Et il faut 0,78 secondes pour faire un tour de pédalier. À chaque tour de pédalier, la cheville de Maurice parcourt deux fois  $30^\circ$  autour de son axe de flexion-extension.  $60^\circ$  en 0,78 seconde font une vitesse moyenne de  $77^\circ/s$ . Pour le genou, la vitesse est de  $192^\circ/s$ . Pour la hanche, la vitesse angulaire moyenne est d'environ  $115^\circ/s$ .

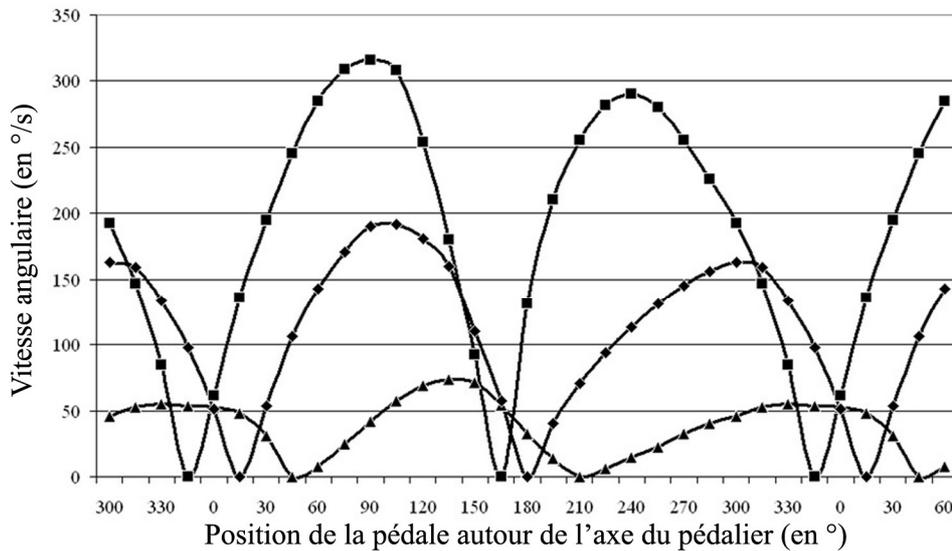


Figure 2.14. Evolution de la vitesse angulaire de chaque articulation pendant un cycle complet de pédalage.

Nous venons de parler de vitesses angulaires moyennes. Pendant le cycle de pédalage, les mouvements sont alternatifs et la vitesse articulaire variable. À partir des courbes montrant les angles de flexion et d'extension des trois articulations pendant la révolution de la pédale (voir en 2.2.1 et sur la figure 2.10) la vitesse angulaire instantanée peut être calculée. Elle est proportionnelle à la pente de ces courbes, sous réserve d'une fréquence de pédalage régulière. Elle est nulle au moment du passage de la flexion à l'extension et réciproquement. C'est ce qu'illustre la figure 2.14.



Chez Maurice, les vitesses angulaires de ses trois articulations passent par des maxima proches de  $150^\circ/s$  pour la cheville,  $200^\circ/s$  pour la hanche et  $300^\circ/s$  pour le genou.

### 2.3.2.3. Vitesse d'un solide en rotation : $v = R \times \omega$

Pour un point donné d'un solide en rotation, la vitesse  $v$  de ce point est fonction de sa distance  $R$  à l'axe de rotation et de la vitesse angulaire  $\omega$ .



La vitesse moyenne de rotation de la rotule de Maurice autour de la hanche est de 0,92 m/s. La vitesse de glissement de sa rotule sur la trochlée fémorale est de 0,15 m/s.

## 2.3.3 L'ACCÉLÉRATION

L'accélération  $\mathbf{A_c}$  est la variation de la vitesse  $\mathbf{v}$  en fonction du temps  $\mathbf{t}$ . Comme la vitesse est le rapport de la distance  $\mathbf{d}$  au temps  $\mathbf{t}$  mis à la parcourir, l'accélération est le rapport de la distance au carré du temps.

$$\mathbf{A_c} = \mathbf{d} / \mathbf{t}^2$$

De même que l'on a parlé de vitesses linéaire et angulaire, on parlera d'accélération linéaire et angulaire.

### 2.3.3.1. Accélération linéaire :

Si l'on parle de l'accélération moyenne, on l'écrira :  $\mathbf{A_c} = (\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2) / (\mathbf{t}_1 - \mathbf{t}_2)$



Avant de placer un démarrage fulgurant, Kevin parcourait 10 m/s. Cinq secondes après, il parcourt 13 m/s. Le démarrage a provoqué une accélération moyenne égale à  $(13 - 10) / 5 = 0,6 \text{ m/s}^2$ .

### 2.3.3.2. Accélération angulaire :

L'accélération angulaire s'écrit :  $\mathbf{A_c} = \alpha / t^2$

Si l'on parle de l'accélération moyenne on l'écrira :  $\mathbf{A_c} = (\omega_1 - \omega_2) / (t_1 - t_2)$

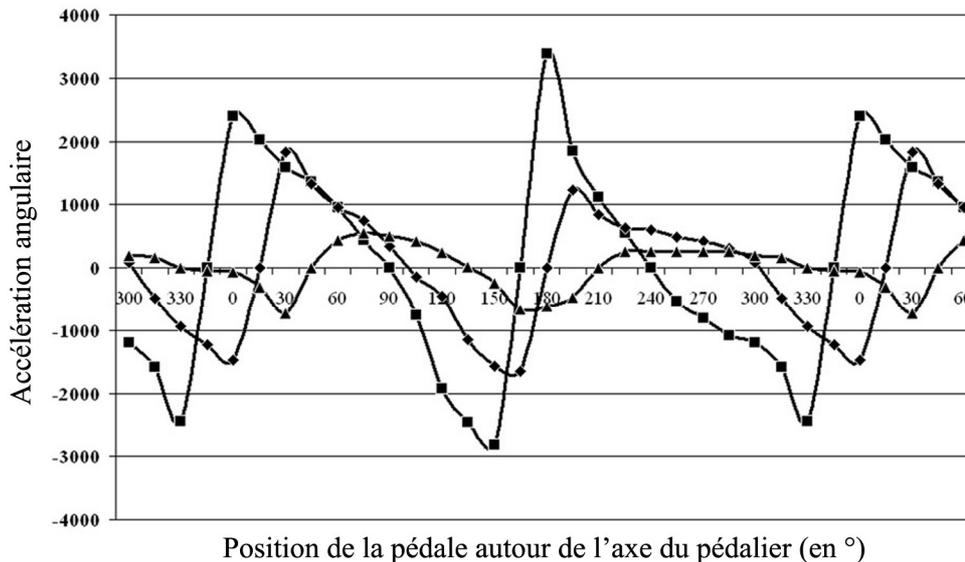


Figure 2.15. Variations de l'accélération angulaire de chaque articulation au cours du cycle de pédalage.

### 2.3.3.3. Application au pédalage

Pendant le pédalage, la vitesse angulaire des articulations varie en permanence. Les mouvements subissent donc des accélérations proportionnelles, à chaque moment, à la pente de la courbe des vitesses telle que nous l'avons dessinée en 2.3.2.2 (figure 2.14). Les courbes des accélérations pour les trois articulations sont illustrées sur la figure 2.15.

L'accélération, elle aussi, varie en permanence. Au début de chaque mouvement d'extension et de flexion des trois articulations, il y a une accélération (de la vitesse angulaire) qui passe de la valeur 0 à sa valeur maximale dès le début du mouvement. Puis l'accélération diminue jusqu'à devenir négative. C'est alors une décélération, jusqu'à ce que la vitesse redevienne nulle.



- À 345° de la révolution de la pédale, le genou passe de la flexion à l'extension. La vitesse angulaire est nulle.
- À 0°, le genou est en pleine extension. La vitesse angulaire est de 62°/s. L'accélération moyenne est de :  $(62 - 0) / (t_{360} - t_{345}) = 62 / 0.032 = 1.938^\circ/\text{s}^2$ .
- À 150° et 165°, la cheville est en pleine décélération pour bientôt passer de l'extension à la flexion. Les vitesses sont de 72°/s et 48°/s. L'accélération moyenne entre ces deux points est égale à :  $(48 - 72) / 0.032 = -750^\circ/\text{s}^2$ .

Nous reviendrons sur toutes ces notions, à propos de l'énergie cinétique, au chapitre 11.