

Chapitre 14.

LA FRÉQUENCE DE PÉDALAGE

« Seul le rythme provoque le court-circuit poétique et transmue le cuivre en or, la parole en verbe. »
Léopold Sédar SENGHOR, *Éthiopiennes*, Postface, 1956.

14.1. TRANSMISSION DE L'EFFORT PAR LA BICYCLETTE

La bicyclette sert à porter le cycliste, lui permet de se diriger, de freiner... Elle lui permet aussi d'avancer grâce à un organe de transmission composé du pédalier et ses plateaux, du dérailleur avant, de la chaîne, de la roue libre et ses pignons, du dérailleur arrière et enfin de la roue arrière. Avant de se lancer dans le grand concert du voyage à bicyclette ou d'une folle envolée sur les routes alpestres, précisons quelques éléments de solfège, que nous reprendrons au chapitre 15, et prêtons une oreille attentive aux instruments utilisés.

14.1.1. LES BASES DU SOLFÈGE, LES INSTRUMENTS ET LEURS CONTRAINTES D'UTILISATION

14.1.1.1. Le braquet Br

Le braquet est le rapport, ou le quotient, entre le nombre de dents de la couronne de pédalier (le plateau) et le nombre de dents de la couronne de la roue libre (le pignon). Il s'agit d'une notion abstraite que l'on symbolise par une fraction ou par le résultat de cette fraction. Prenons un exemple. Le braquet correspondant à un plateau de 43 dents et à un pignon de 18 dents s'écrit $43/18$ ou 2,39. Il ne faut pas l'écrire 43×18 car ce n'est pas une multiplication mais une démultiplication, une division.

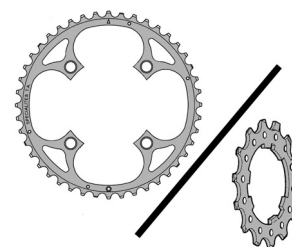


Figure 14.1. Le braquet.
$$\frac{\text{Nb dents plateau}}{\text{Nb dents pignon}}$$

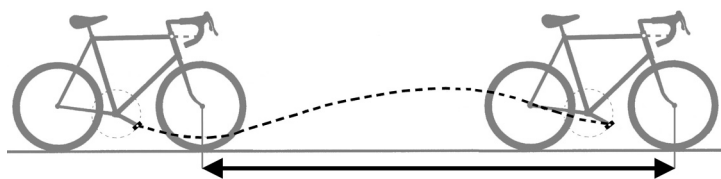


Figure 14.2. Le développement :
distance parcourue à chaque tour du pédalier.

14.1.1.2. Le développement

Le développement est la distance parcourue à chaque tour de pédalier. Il s'agit, cette fois, d'une notion concrète qui s'exprime en mètres. La relation entre le braquet et le développement, dans laquelle r est le rayon de la roue, est la suivante :

$$\text{Développement} = Br \times 2 \times \pi \times r$$

On peut l'obtenir de trois manières, les mesures étant toujours faites sur une bicyclette en charge de son cycliste et d'éventuels bagages. On peut mesurer au sol la distance parcourue. On peut aussi multiplier la circonférence de la roue, mesurée au sol elle aussi, par le braquet. On peut, enfin, multiplier le rayon de la roue (distance de l'axe du moyeu au sol) par 2π et par le braquet.

Poursuivons notre exemple : avec un braquet de $43/18$ pour une roue de 2,00 mètres de circonférence, la distance parcourue à chaque tour de pédalier est de 4,78 mètres. C'est le développement. Cette distance que l'on parcourt est le résultat concret de l'effort du cycliste. Nous allons cependant poursuivre notre « démonstration » en utilisant le concept de braquet, plus propice à une théorie. Il faudra toujours avoir à l'esprit que si les roues sont grandes, les braquets doivent être pensés avec modération (pignons avec plus de dents ou plateaux plus petits, par exemple). À l'inverse, si les roues sont petites, les braquets doivent être plus conséquents (petits pignons ou grands plateaux).

14.1.1.3. Le dérailleur arrière

Le dérailleur arrière a pour fonction d'augmenter le nombre de braquets disponibles en faisant passer la chaîne sur les couronnes de la roue libre (appelées pignons) dont le nombre de dents est différent. Le dérailleur arrière permet de modifier le dénominateur du braquet. Il est suffisamment souple dans son fonctionnement pour que le changement de pignon s'accomode tant bien que mal de la continuité de l'effort. Les dérailleurs arrière modernes peuvent accepter, selon leurs caractéristiques, jusqu'à dix pignons. Ils sont tous manœuvrés par une manette crantée et indexée, c'est-à-dire qu'à chaque cran de la manette correspond un pignon et un seul. Le dérailleur arrière a une autre fonction. C'est lui qui assure la tension de la chaîne. Si l'on veut avoir de grands écarts de denture sur les plateaux et pignons, il faut le choisir avec une capacité de tension suffisante. Celle-ci est en relation avec la longueur de la chape qui relie les deux roulettes.



Figure 14.3. Le dérailleur arrière.
Modèle route à chape courte
"105" de Shimano.

14.1.1.4. Le dérailleur avant

Le dérailleur avant augmente le choix de braquets en permettant à la chaîne de passer sur des couronnes de pédalier (plateaux) dont le nombre de dents est différent. Il fait varier le numérateur du braquet. Son maniement est plus délicat que celui du dérailleur arrière, car le changement de plateau nécessite que le cycliste soulage légèrement la pédale, qu'il débraye en quelque sorte, pour que la chaîne puisse passer en douceur d'un plateau à l'autre. Changer de plateau en plein effort "casse l'allure". C'est pourquoi il vaut mieux limiter le nombre des plateaux à 2 ou 3 et multiplier le nombre des pignons pour en utiliser 7, 8, 9 ou même 10. Les dérailleurs avant fonctionnent quelquefois avec une manette indexée, c'est-à-dire qu'à chaque cran de la manette correspond un plateau. Le plus souvent il s'agit d'une micro indexation (à chaque plateau correspondent plusieurs crans choisis en fonction de la ligne de chaîne) ou même d'une simple rétro friction permettant un maniement à la fois souple et précis.



Figure 14.4. Le dérailleur avant.
Modèle route pour double plateau,
"105" de Shimano.

14.1.1.5. Les contraintes mécaniques : doubles emplois et ligne de chaîne

Avec les pédales à trois plateaux, les roues libres à 7, 8, 9 ou 10 pignons, les dérailleurs de grande capacité, il est possible de disposer de 21, 24, 27 ou même 30 braquets. Du moins en théorie, ceci pour deux raisons. Tout d'abord, les doubles emplois sont fréquents : les braquets 42/14, 45/15 et 48/16, par exemple, ont la même valeur. Ensuite, il ne faut utiliser que les associations entre plateaux et pignons assurant un bon rapport mécanique, par une ligne de chaîne acceptable, c'est-à-dire par un alignement correct des plans

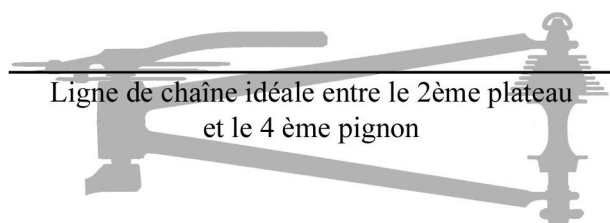


Figure 14.5. Une bonne ligne de chaîne est un impératif mécanique, pour réduire les frottements et faire durer le matériel.

respectifs du plateau et du pignons utilisés. Ceci est impératif, même si les chaînes modernes sont d'une remarquable souplesse. Ainsi, avec trois plateaux et neuf pignons, si le plan du plateau médian coïncide avec celui du pignon médian, on n'utilisera avec le grand plateau que les cinq ou six premiers pignons. Avec le plateau médian, on pourra jouer sur les sept pignons centraux, et avec le petit plateau sur les cinq ou six derniers.

14.1.2. RAPPORTS DE FORCES

14.1.2.1. Calcul du rapport des forces au niveau de la transmission

Regardons maintenant ce qui se passe dans le mécanisme de transmission de la bicyclette et admettons que les frottements au niveau du pédalier, de la chaîne, du dérailleur et de la roue libre sont négligeables (nous les avons évalués dans le bloc des « frottements secs » au chapitre 12, en 12.2).

- 1) En pédalant, le cycliste produit une force F tangente au cercle de révolution de la pédale. Elle provoque un mouvement de rotation du pédalier autour de son axe.
- 2) Le moment de la force qui fait tourner le pédalier est égal à la longueur des manivelles $M \times F$.
- 3) Soit P le nombre de dents du plateau porté par le pédalier et p le nombre de dents du pignon (le braquet Br est le rapport P/p) et δ la distance entre 2 dents divisée par 2π .
- 4) Le plateau de P dents a un rayon égal à $P \times \delta$.
- 5) Soit $F_{chaîne}$ la force appliquée par le plateau sur la chaîne, tangente au plateau.
- 6) Le moment de $F_{chaîne}$ par rapport à l'axe du pédalier est tel que $F_{chaîne} \times P \times \delta = F \times M$.
D'où $F_{chaîne} = (F \times M) / (P \times \delta)$.
- 7) La force $F_{chaîne}$ est transmise au pignon par la chaîne.
- 8) Le rayon du pignon de p dents est de $p \times \delta$.
- 9) Le moment de la force appliquée par la chaîne au pignon, par rapport à l'axe de la roue, est égal à $F_{chaîne} \times p \times \delta$.
- 10) Soit r le rayon de la roue et F_{roue} la force qui s'applique à sa périphérie.
- 11) Le moment de la force F_{roue} est tel que $F_{roue} \times r = F_{chaîne} \times p \times \delta$.
- 12) D'où $F_{roue} \times r = [(F \times M) / (P \times \delta)] \times p \times \delta$ et $F_{roue} = F \times M \times p / P$, le tout divisé par r .
- 13) La force de réaction F_{route} de la route est par définition opposée et égale à F_{roue} , mais de sens contraire. C'est elle qui propulse l'homme et sa machine.

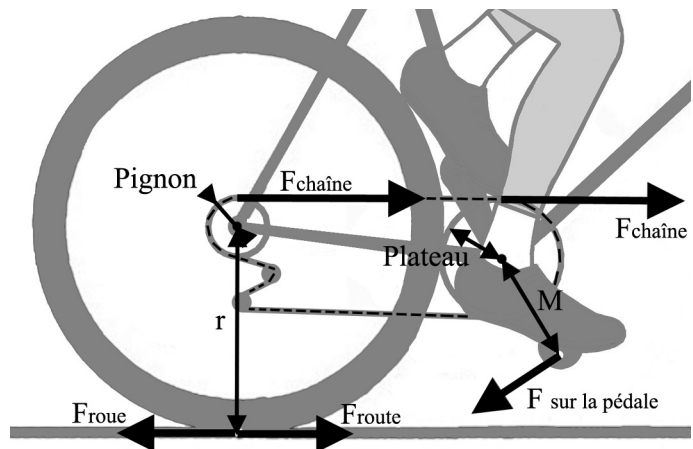


Figure 14.6. Les rapports de force entre pédales et plateaux, entre pignons et roue arrière, entre roue arrière et route, via la chaîne.

Au total, on a la relation suivante : $F_{roue} = (F \times M) / (Br \times r)$

Nonobstant les frottements sur le vélo, la force de propulsion du cycliste et de son vélo est proportionnelle à l'effort fourni par le cycliste et à la longueur des manivelles. Elle est inversement proportionnelle au rayon de la roue et au braquet. Dans un premier temps, on pourrait donc dire que l'on a intérêt à utiliser des manivelles longues. Mais nous avons vu au chapitre 8 (en 8.3.4) que la longueur des manivelles est limitée par le jeu articulaire. Nous y reviendrons à propos de la fréquence de pédalage (en 14.2) et au chapitre 15 (en 15.2). On peut aussi dire qu'on a intérêt à utiliser des petites roues et des petits braquets. C'est-à-dire des petits développements. Mais il faut bien avancer tout de même, à une vitesse suffisante, avec une fréquence de pédalage compatible avec le fonctionnement des muscles, en ayant un débit d'énergie compatible avec ses capacités...

Dans la pratique, vouloir déduire F_{roue} de F est illusoire parce que F , produit du travail interne, est difficilement quantifiable. Or F_{roue} peut être facilement déduit du travail externe, lequel est aisé à quantifier, nous l'avons vu aux chapitres 11 et 12 et nous y reviendrons plus bas.

La relation opérationnelle sera donc : $F = F_{roue} \times Br \times r / M = F_{roue} \times Br \times C_{rm}$

dans laquelle C_{rm} est une caractéristique de la bicyclette égale au rapport entre le rayon r de la roue motrice et la longueur M des manivelles (r/M).

			
Rayon de la roue motrice (mm)	315	315	334
Longueur des manivelles (mm)	170	160	175
Valeur de C_{rm}	1,85	1,97	1,91

Et en retournant cette formule jusqu'au bout, on peut écrire : $Br = (F / F_{roue}) \times C_{rm}$. Le braquet, est égal au rapport entre la force appliquée sur la pédale et la force appliquée par la roue sur la route, multiplié par une constante liée au vélo. Il est donc proportionnel, comme nous allons le voir plus bas, au rapport entre la force appliquée sur la pédale et la force à vaincre. Le braquet définit, régule en quelque sort, un rapport de forces entre le cycliste et la route.

14.1.2.2. Force moyenne < F >

Nous avons vu (en 7.7.2) que la force F efficace sur la pédale ($F_D + F_G$) évolue au cours du cycle de pédalage et passe par deux minima et deux maxima. Considérons qu'il existe une force F moyenne, que l'on écrit $\langle F \rangle$. Selon la qualité du coup de pédale, les deux phases critiques basse et haute sont plus ou moins bien « négociées ». Si le pédalage est passif comme dans le modèle à piston décrit en 7.4.1, la force F varie de 0 à environ 1,6 fois la force moyenne $\langle F \rangle$ (en grisé foncé sur la figure 14.7). Celle-ci est égale, à peu près, au 3/5 de la force maximale F . Avec le pédalage actif et coordonné décrit en 7.7.2 (grisé foncé + grisé clair sur la figure 14.7) la force F ne varie que d'environ 0,5 à 1,5 fois la force $\langle F \rangle$. Et la force moyenne est à plus des 2/3 de la force F maximale.



Pour produire une force moyenne de 100 newtons, Maurice, qui pédale bien, devra exercer une force de 148 N quand la pédale droite est en avant (115 N à droite et 33 N pour la pédale gauche qui est en arrière).

Dans les phases critiques, il devra fournir 50 N, à peu près également répartis entre les deux pédales. S'il pédalait comme un débutant, pour une même force moyenne de 100 N, il devrait fournir 162 N quand la pédale droite est en avant (126 N à droite et 36 N à gauche). Dans les phases critiques il ne ferait aucun effort (ne produirait aucune force).

14.1.2.3. Force à la périphérie de la roue F_{roue} et force de réaction de la route F_{route}

La force F_{roue} suit les variations de F . Considérons donc qu'il existe également une force moyenne $\langle F_{roue} \rangle$. La réaction de la route n'est qu'une réponse à F_{roue} , en application de la troisième loi sur le mouvement d'ISAAC NEWTON. Cette force F_{route} est égale, de même direction et de sens opposé à la force à vaincre F_V pour avancer sur sa bicyclette. Elle varie, en intensité, comme F et F_{roue} , il existe donc une force de réaction moyenne $\langle F_{route} \rangle$. Au total, pour simplifier nos calculs ultérieurs, on utilisera les formules suivantes, dans lesquelles la force est une force moyenne, considérée pour son intensité :

$$F = F_{roue} \times Br \times C_{rm} = F_{route} \times Br \times C_{rm} = F_V \times Br \times C_{rm}$$

14.1.3. FORCES À VAINCRE

Appelons F_V les forces à vaincre. F_V est la somme des résistances à vaincre, dans sa progression, par le cycliste. Ce sont la pesanteur (F_{poids}) et les forces dues aux frottements ($F_{frottement}$). Nous admettrons, par simplification, que F_V inclue les frottements internes au cycliste et à sa bicyclette. En toute rigueur, ces derniers frottements, qui sont des frottements secs, interviennent dans la genèse de F par le travail interne, pour partie, entre F et F_{roue} dans l'appareil de transmission de la bicyclette, pour une autre partie, et enfin dans les frottements par roulement.

L'allure du cycliste ne semble pas saccadée. On peut donc imaginer que, les conditions extérieures restant identiques, les résistances à vaincre ne varient pas, y compris celles de frottement qui sont liées à la vitesse. Nous avons vu au chapitre 11 (en 11.3) que l'énergie cinétique, surtout de translation, est précieuse pour maintenir une vitesse régulière. Mais nous verrons plus bas (en 14.2.5) que la vitesse de rotation de la pédale autour de l'axe du pédalier n'est pas tout à fait constante et que la pédale subit une très légère accélération au moment de pleine efficacité du pédalage. Cette accélération minime se répercute logiquement sur la roue et l'allure du cycliste, même si elle est quasi imperceptible.

14.1.3.1. Force à vaincre liée au poids F_{poids}

Le poids, sur lequel nous avons longuement disserté au chapitre 10, est une force dirigée verticalement vers le bas. La force F_{poids} peut être décomposée en deux forces orthogonales. L'une est perpendiculaire au sol, l'autre est parallèle au sol. On va appeler cette dernière F_{Vpoids} parce que c'est, justement, la force à vaincre qui est de sens opposé à celui du mouvement.

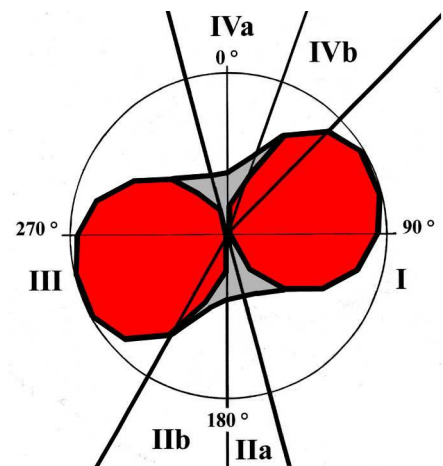


Figure 14.7. Représentation graphique de $\langle F \rangle$ au cours du cycle de pédalage.

Sur une route horizontale, $F_{V_{\text{poids}}} = 0$. Mais quand ça monte, $F_{V_{\text{poids}}}$ est égale au poids multiplié par la pente de la route, c'est-à-dire la dénivelée h divisée par la distance parcourue d .

$$F_{V_{\text{poids}}} = F_{\text{poids}} \times h / d$$

Pour vaincre la force $F_{V_{\text{poids}}}$, le cycliste va devoir produire sur la route une force $< F_{\text{roue}} >$ d'intensité égale à $F_{V_{\text{poids}}}$ (et de même sens : c'est la force de réaction de la route qui est de sens inverse).

	Ascension du Mont-Ventoux depuis		
	Bédoin	Malaucène	Sault
Pente moyenne (%)	8,2	7,6	4,7
$F_{V_{\text{poids}}}$ (N)	69	64	39

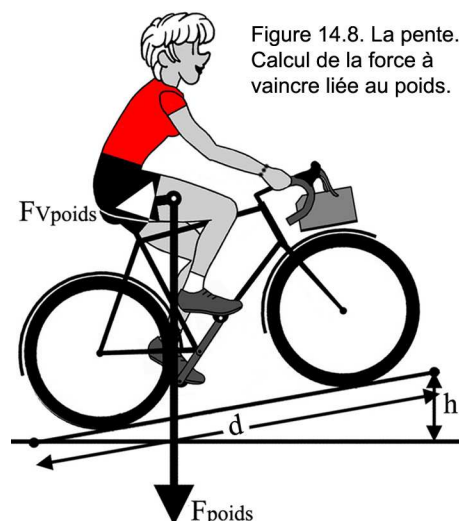


Figure 14.8. La pente. Calcul de la force à vaincre liée au poids.

14.1.3.2. Force à vaincre liée aux frottements $F_{V_{\text{frottements}}}$

Pour connaître la force à vaincre due aux frottements, il suffit de diviser le chiffre de l'énergie dépensée en frottements par la distance parcourue. $F_{V_{\text{frottements}}} = E_{\text{frottements}} / d$. Notons qu'avec la méthode de calcul que nous avons proposé (en 12.2.1) nous obtenons l'énergie dépensée par mètre parcouru, c'est-à-dire, si l'énergie s'exprime en joules, la force en newtons.

14.1.3.3. Addition des deux forces

Les forces $F_{V_{\text{frottements}}}$ et $F_{V_{\text{poids}}}$ sont de même direction que la trajectoire du cycliste, mais de sens opposé. Elles s'additionnent pour former la totalité des forces à vaincre. $F_V = F_{V_{\text{frottements}}} + F_{V_{\text{poids}}}$. Nous en verrons une illustration plus bas.

14.2. LA VITESSE DU CYCLISTE

Personne ne peut nier que l'intention du cycliste qui pédale est d'acquérir une certaine vitesse. Le coureur veut aller vite, le plus vite possible même, pour gagner ou pour se dire qu'il « fonctionne » bien ou pour les deux motifs. Le cyclotouriste veut avancer, plutôt longtemps que vite, pour voir se dérouler les paysages, arriver à temps dans telle auberge ou telle église romane, et également pour se dire qu'il « fonctionne » bien, lui aussi.

14.2.1. CALCUL ET/OU MISE EN ÉVIDENCE DE LA VITESSE

La vitesse du cycliste peut être calculée par la formule suivante, dans laquelle la vitesse est exprimée en mètres/seconde, le rayon r de la roue en mètres et la fréquence de pédalage f_p en tours de pédalier par minute (tpm) :

$$\text{Vitesse} = Br \times f_p \times 2\pi r / 60$$

Pour un cycliste sur un vélo donné, la relation est la suivante : $\text{Vitesse} = Br \times f_p \times C_r$ dans laquelle C_r est une des caractéristiques du vélo égale à la circonférence des roues (en mètres et divisée par 60 si f_p s'exprime en tours par minute = $2\pi r/60$).

			
Rayon de la roue motrice (m)	0,315	0,315	0,334
Valeur de C_r	0,033	0,033	0,035

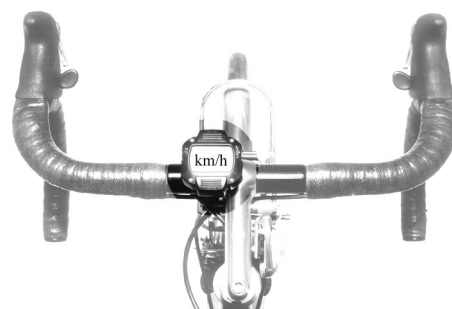


Figure 14.9. De petits compteurs électroniques donnent la vitesse instantanée, la distance parcourue, la fréquence de pédalage... voire l'altitude, la température, la fréquence cardiaque.

On peut aussi calculer la vitesse à partir de la formule :

$$V \text{ (km/h)} = \text{développement (m)} \times f_p \text{ (tpm)} \times 0,060$$

On peut enfin lire sa vitesse d'une manière instantanée en utilisant un compteur fixé sur le cintre, qui la donne en km/h ou en miles/heure.

14.2.2. PUISSANCE DÉVELOPPÉE SELON LA VITESSE

Nous savons que la puissance développée par un cycliste évolue proportionnellement à la vitesse de déplacement, à la vitesse relative de l'air et à la vitesse d'ascension. Illustrons cela pour Maurice, en synthèse, dans les circonstances évoquées ci-dessus et au cours des chapitres précédents : Maurice ne peut développer qu'une puissance de 280 watts au maximum (voir en 13.2.7). À 196 watts, il n'a pas atteint son seuil d'accumulation des lactates dans le sang (215 w), mais il n'en est pas très loin. S'il veut s'économiser il doit rouler un peu moins vite face au vent, à 12 km/h par exemple.

		Sans vent		Avec un vent de face de 30 km/h	
		Caen → Mer	Mont-Ventoux	Caen → Mer	Caen → Mer
	Vitesse (m/s)	6,3	2,2	4,2	3,3
	Vitesse (km/h)	22,5	8	15	12
	$F_{\text{frottements}}$ (N)	16	7	47	41
	F_{vpoids} (N)	0	69	0	0
	Force à vaincre (N)	16	76	47	41
	Braquet	43/17	30/28	43/21	30/19
	Fréquence de pédalage (tpm)	75	63	62	64
	Force moy. sur les pédales (N)	75	151	178	120
	Puissance (w)	100	168	196	137

Reprenons l'exemple de Maurice dans le Ventoux, depuis Bédoin. En tenant compte des frottements, qui s'accroissent avec la vitesse d'ascension, les puissances développées par notre cobaye sont les suivantes :

	Vitesse d'ascension (m/h)	400	500	600	800
	Puissance (w)	101	127	156	207

Avec une vitesse d'ascension de 1.000 mètres par heure, la puissance développée par Maurice serait de 266 watts, mais c'est quasiment hors de sa portée. Notons ici, que les cyclotouristes considèrent qu'une vitesse d'ascension de 600 mètres à l'heure est tout à fait correcte. Avec 10 kg de bagages supplémentaires, il vaut mieux compter 500 mètres à l'heure. Les coureurs ont des vitesses d'ascension qui sont plutôt de l'ordre de 1.200 ou 1.300 m/h sur plusieurs cols et aux alentours de 1.600 m/h dans une dernière ascension. Elles peuvent approcher 1.750 m/h dans un contre la montre sur un seul col.

Enfin, pour une même puissance, et donc la même vitesse de déplacement, la fréquence de pédalage f_p varie selon le braquet. C'est une évidence.



Ventoux en 2 h 30, soit 654 m/h. Selon le braquet, la fréquence de pédalage f_p serait :						
Braquet	24/28	28/28	30/28	32/28	30/23	43/28
Valeur Br	0,86	1	1,07	1,14	1,30	1,54
f_p (tpm)	78	67	63	57	52	43

14.2.3. ET NOUS VOICI AU « NŒUD THÉORIQUE »

Un « nœud théorique » conduit notre réflexion dans cet ouvrage. La puissance est, pour les cyclistes, le produit de la force à vaincre F_v par la vitesse de déplacement V , c'est-à-dire par le braquet Br , la fréquence de pédalage f_p et le facteur C_r lié à la taille des roues (voir en 14.2.1). Il s'agit de ce que nous pouvons appeler la « puissance externe », quantifiable par la connaissance aisée que l'on a de chacun des termes.

$$P_{\text{ext}} = F_V \times V = F_V \times Br \times f_p \times 2\pi r = F_V \times Br \times f_p \times C_r$$

L'équation qui donne la puissance « interne » est, elle aussi, facile à écrire. C'est le produit de la force F exercée sur la pédale par la vitesse de déplacement de cette pédale :

$$P_{\text{int}} = F \times V_{\text{pédale}} = F \times f_p \times 2\pi \times M = F \times f_p \times C_m$$

Le facteur C_m est constant, il est lié à la longueur des manivelles et est égal à $2\pi \times M$, c'est-à-dire à la distance parcourue par la pédale à chaque tour de pédalier (divisée par 60 si la f_p s'exprime en tpm).

			
Longueur des manivelles (m)	0,170	0,160	0,175
Valeur de C_m	0,0178	0,0168	0,0183

Si la fréquence de pédalage est aisée à connaître, la force F n'est quantifiée qu'à partir de la force externe F_V ($F = F_V \times Br \times C_{rm}$), sauf à disposer d'un matériel de laboratoire adéquat. Nous ne sommes plus dans les conditions habituelles de pratique du cyclisme. Connaissant cette relation entre F_V et F , il est facile de démontrer que $P_{\text{ext}} = P_{\text{int}}$ (sachant que $C_{rm} \times C_m = C_r$) :

$$P_{\text{int}} = F \times f_p \times C_m = F_V \times Br \times C_{rm} \times f_p \times C_m = F_V \times Br \times f_p \times C_r = P_{\text{ext}}$$

Et dans tous les cas, la puissance est bien liée à la fréquence de pédalage. Le décor est donc planté, les personnages sont présentés, leurs capacités sont connues. Il est temps d'aborder directement le problème de f_p et de regarder comment on peut le théoriser et en tirer des conséquences pratiques sur la manière de pédaler, de s'entraîner et de s'économiser ou non.

14.3. LA FRÉQUENCE DE PÉDALAGE f_p

Ce sujet fondamental donne lieu à des débats passionnés dans le monde des cyclistes. Grâce aux travaux des chercheurs et des physiologistes et à l'application pratique qu'en a fait le coureur Lance ARMSTRONG, les arguments en faveur de telle ou telle fréquence commencent à être connus de tous. Dans la pratique, la fréquence de pédalage est très variable selon le moment, l'endroit, le cycliste, son style et ses motivations. Il y a de grands moulineurs et des cyclistes à fréquence plus lente. Elle est élevée en compétition, de l'ordre de 100 tours de pédalier par minute, plus modérée chez les cyclotouristes chez qui elle est située aux alentours de 70-80 tours de pédalier par minute.

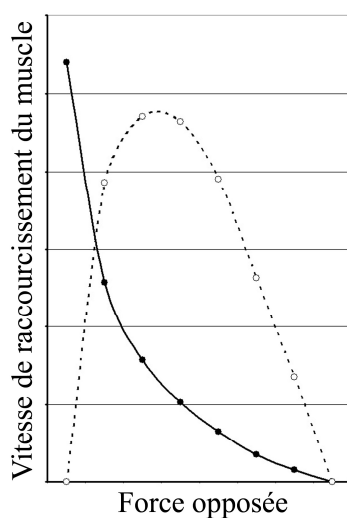


Figure 14.10. Vitesse de raccourcissement du muscle en fonction de la force opposée (trait plein). Puissance du muscle (trait pointillé).

14.3.1. RETOUR SUR QUELQUES POINTS DE PHYSIOLOGIE MUSCULAIRE

14.3.1.1. Relation entre la force et la vitesse

Le mécanisme de la contraction musculaire, que nous avons déjà évoquée (en 7.1.4.2), impose une relation entre la force développée par le muscle et la vitesse d'exécution du mouvement. Répétons le constat : Plus la force à appliquer est grande, plus le mouvement est lent. Tout se passe comme si les réactions chimiques qui libèrent l'énergie à l'intérieur du muscle se déroulaient à une vitesse constante.

Il faut moins de temps pour soulever un objet léger que pour soulever un objet lourd. La courbe en trait plein, sur la figure 14.10 (clone de la figure 7.2), illustre l'évolution de la vitesse maximale de raccourcissement en fonction de la force opposée. La puissance étant une force par une vitesse, on applique au muscle la formule :

$$\text{Puissance} = \text{force opposée} \times \text{vitesse de raccourcissement}$$

On voit bien sur la même figure 14.10 (en trait pointillé) comment la puissance musculaire évolue et passe par un maximum. Il va donc y avoir, chez le cycliste, un compromis entre la force appliquée sur la pédale et la fréquence de pédalage, grâce à l'utilisation judicieuse des braquets qui permettent de tirer le meilleur avantage possible de la relation entre force et rapidité.

14.3.1.2. Différentes fibres musculaires

Il existe différents types de fibres musculaires. Elles sont réparties en deux grands groupes selon leurs caractéristiques. Le tableau ci-dessous montre, en synthèse, leurs différences.

Fibres lentes, de type I	Fibres rapides, de type II
• Contraction lente • Force faible • Très vascularisées • Utilisent très bien O₂ • Peu de déchets • Déchets facilement éliminés • Consomment des lipides • Peu fatigables	• Contraction rapide • Grande force • Peu vascularisées • Utilisent ± bien O₂ • Beaucoup de déchets • Déchets difficilement éliminés • Consomment des glucides • Très fatigables
⇒ Coureurs de fond	⇒ Sprinters

Tableau XIV : Comparatif des fibres musculaires lentes et des fibres rapides.

Les fibres lentes sont sollicitées quand l'effort du muscle n'est pas trop intense, ce sont les fibres des cyclotouristes ou des coureurs cyclistes sur route. Elles sont plus fréquentes dans les muscles extenseurs du membre inférieur, notamment dans le triceps sural. On a vu combien ces muscles sont essentiels dans le pédalage. Elles augmentent, au moins en proportion, avec l'âge. Les fibres rapides sont utilisées pour des efforts intenses, puissants et rapides. Ce sont les fibres des coureurs de vitesse sur piste. Elles sont plus fréquentes dans les muscles fléchisseurs des membres inférieurs. Elles diminuent avec l'âge.

Il y a de grandes variations dans la répartition des fibres musculaires entre les individus, expliquant les différences d'aptitude et donc le type de sport choisi. Tout le monde n'a pas les mêmes capacités à courir le 100 mètres ou à tourner vite les jambes sur une bicyclette. Certes, un entraînement bien adapté peut atténuer les particularités en modifiant la composition des muscles, par augmentation du nombre des fibres les plus mises en jeu. Un sprinter peut se mettre avec succès et plaisir au cyclotourisme, mais il est plus difficile, pour un cyclotouriste, de devenir sprinter. Par exemple, il est probable que la diminution de la force appliquée sur la pédale, en augmentant la fréquence de pédalage, jusqu'à une certaine limite fixée par la vitesse maximale de contraction des fibres lentes, permet de ne pas solliciter les fibres rapides. Dans une pratique comme le cyclotourisme, la mobilisation de ces dernières fibres entraînerait rapidement des douleurs et une fatigue musculaire insurmontable.

14.3.2. QUELQUES DONNÉES DE LABORATOIRE

En laboratoire, on mesure la fréquence de pédalage f_p par rapport au coût métabolique, que l'on peut déterminer par la consommation d'oxygène. On a pu mettre en évidence qu'il existait une relation entre la VO₂ et f_p qui pouvait s'écrire « $VO_2 = af_p^2 + bf_p + c$ » et donner la courbe de la figure 14.11. On a pu également faire un certain nombre de constatations très instructives :

1^{ère} constatation : Pour une puissance donnée, il existe une f_p « idéale » permettant de minimiser la consommation d'oxygène. Cette fréquence idéale se situe aux alentours de 40 à 60 tours de pédalier par minute (tpm) chez des cyclistes peu entraînés. Elle est plus élevée chez des cyclistes bien entraînés, de l'ordre de 60 à 80 tpm.

La différence est due à ce que les cyclistes non entraînés surconsomment l'oxygène par des recrutements musculaires non spécifiques. L'entraînement au pédalage, son apprentissage est donc essentiel. C'est un phénomène identique qui se produit quand la fréquence de pédalage augmente beaucoup. La coordination musculaire devient de plus en plus difficile, à cause du nombre de muscles mis en jeu et de la difficulté à maintenir la position du bassin. Manifestement Lance ARMSTRONG a réussi à bien maîtriser cet aspect de la technique de pédalage par un entraînement adéquat.

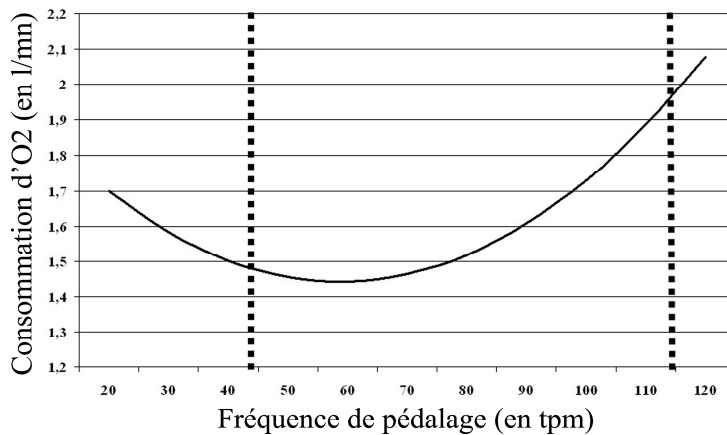


Figure 14.11. Coût énergétique de la fréquence de pédalage.
Les pointillés indiquent les limites "acceptables".

2^{ème} constatation : La fréquence de pédalage augmente en fonction de la puissance développée. Pour augmenter sa puissance (force $\times$ vitesse) le cycliste accélère plus la cadence qu'il n'augmente la force développée par ses muscles.

3^{ème} constatation : Pour un effort modéré (puissances < 180 watts), la plus faible consommation d'oxygène est observée pour une f_p de l'ordre de 60 tpm, alors que la perception de l'effort est minimale à 80 tpm.

4^{ème} constatation : Chez les coureurs, la fréquence de pédalage spontanée est toujours plus élevée que la fréquence idéale, notamment en cas de charge de travail importante.

Tout ceci s'expliquerait par la nécessité de privilégier l'abaissement des contraintes musculaires, quitte à augmenter le coût métabolique. Dans une course par étape, par exemple, il est relativement facile de compenser le coût métabolique, il est plus difficile d'avoir une bonne récupération musculaire si on a trop sollicité les organes de la motricité. Le cycliste entraîné suit ses sensations musculaires et adapte ainsi sa fréquence de pédalage. Là encore, cela implique d'avoir bien travaillé la coordination musculaire pour être efficace et pas trop coûteux.

En conclusion provisoire de ces travaux, on peut dire qu'il y a une plage optimale des fréquences de pédalage entre deux limites (figure 14.11). La limite basse est constituée par les contraintes périphériques, notamment musculaires, et se situe aux alentours de 40 à 50 tours de pédalier par minute. La limite haute est imposée par la sollicitation cardio-respiratoire et par la difficulté d'une bonne coordination motrice. Selon les cyclistes, elle se situe vers 100 à 110 tours de pédalier par minute. Mais des coureurs très entraînés, notamment sur piste, peuvent atteindre des fréquences de l'ordre de 160 tpm. Il est vrai qu'ils ne sont plus dans l'effort aérobie et que leur souci n'est pas de faire des économies.



14.3.3. LE PÉDALAGE EXEMPLAIRE DE LANCE ARMSTRONG

Ce qui est intéressant chez Lance ARMSTRONG, ce ne sont pas les polémiques à propos d'un possible dopage, ce sont ses dons exceptionnels d'athlète, son intelligence de son sport, son travail enfin. Il est un technicien hors pair du vélo, son exemple est donc utile. Le pédalage de Lance ARMSTRONG est extrêmement efficace. Par rapport aux autres coureurs, il se caractérise par deux originalités : une fréquence de pédalage élevée et une utilisation répétée de la danseuse. Sa fréquence de pédalage est très élevée, notamment en montagne et pendant les épreuves contre la montre. De 80 tours de pédalier par mn (tpm) dans les premiers cols d'une étape de montagne, ce qui est déjà beaucoup, elle atteint 100 tpm (et il est bien le seul à tourner aussi vite) dans la dernière montée où se joue la victoire d'étape et se créent les différences de temps au classement général.

Une telle vitesse de rotation des pédales n'est pas innée. Si Lance ARMSTRONG est naturellement souple, il est aussi bien posé sur le vélo, son bassin est parfaitement fixé. Cette fréquence de pédalage élevée est surtout le résultat d'un entraînement rationnel et intense permettant, entre autres, d'améliorer la coordination musculaire. Le but recherché est de développer une grande puissance tout en ménageant les muscles. Tourner vite les pédales est, certes, plus coûteux sur le plan métabolique et énergétique mais permet de diminuer la force exercée sur la pédale, la tension musculaire, l'accumulation de lactates dans les muscles actifs et, ainsi, d'améliorer la récupération musculaire après l'exercice. L'exercice, obligatoirement limité dans la durée, est un excellent compromis biomécanique qui permet de gagner du temps sur les concurrents et de repartir le lendemain sans être handicapé.



Lance ARMSTRONG, pédaleur extrême, était capable de monter le Ventoux depuis Bédoin en moins d'une heure, à plus de 22 km/h, en développant sur la durée de la montée une puissance de 425 W. Sa fréquence de pédalage, avec un braquet moyen de 39/22, était aux alentours de 100 tpm !

Chez lui, l'utilisation de la danseuse permet de soulager les muscles du pédalage, en les faisant travailler autrement, et d'exercer une force plus grande. Elle est d'autant plus consommatrice en énergie que la coordination musculaire n'est pas excellente. À cette condition, il s'agit d'une technique de pédalage rationnelle sur le plan biomécanique.

14.3.4. SUR LA ROUTE DES CYCLOTOURISTES

Ces études ont été réalisées avec des coureurs de bon niveau. Il est plus que vraisemblable que chez des cyclotouristes, tout aussi « experts » mais plus âgés et dont la pratique est très différente de la compétition, on ne trouverait pas les mêmes résultats. Cependant, l'analyse et l'interprétation des travaux de laboratoire éclairent tout aussi bien le geste du cyclotouriste.

Les cyclotouristes sont donc souvent très expérimentés. Ils sont nombreux à parcourir plus de 10.000 kilomètres par an, à avoir cumulé sur leurs montures plus que la distance de la Terre à la Lune, ou à avoir franchi plusieurs centaines, voire plusieurs milliers de cols dans leur vie pédalante. Ils roulent plutôt à l'économie et utilisent de petits braquets. Ils ne sont pas dans le choix entre épargne métabolique et tolérance musculaire, ils privilégient une consommation métabolique faible et pédalent en deçà des possibilités de leur organisme. Ils utilisent ainsi des fréquences de pédalage plus basses que celles des coureurs cyclistes. Ils roulent enfin au plaisir et gardent suffisamment de marge métabolique pour encaisser certains « abus » œnologiques et gastronomiques. En fait, ce que nous avons constaté sur la route des cyclotouristes c'est que la fréquence de pédalage varie avec le braquet. Elle diminue au fur et à mesure que le cyclotouriste utilise des braquets plus petits. Il y a non seulement une relation entre la vitesse du cycliste et le braquet utilisé, on s'en serait douté, mais aussi entre la fréquence de pédalage et le braquet.

Le graphique de la figure 14.12 montre dans quelle zone de fréquence pédale notre cobaye, en fonction du braquet. Ces courbes ont été dessinées à partir des fréquences de pédalages constatées au moment où Maurice « rétrograde » sur un braquet plus petit, ou « monte » sur un braquet plus grand.

La f_p de Maurice varie dans de larges limites. Rarement inférieure à 60, elle atteint 115 tpm.

En vitesse de croisière, f_p est toujours plus élevée que la fréquence minimale, de 10 à 15 tpm. En montagne elle est souvent de 60-70 tpm et de l'ordre de 90-100 sur le plat. La fréquence maximale (■) est indiquée par la courbe supérieure et la fréquence minimale (◆) par la courbe inférieure.

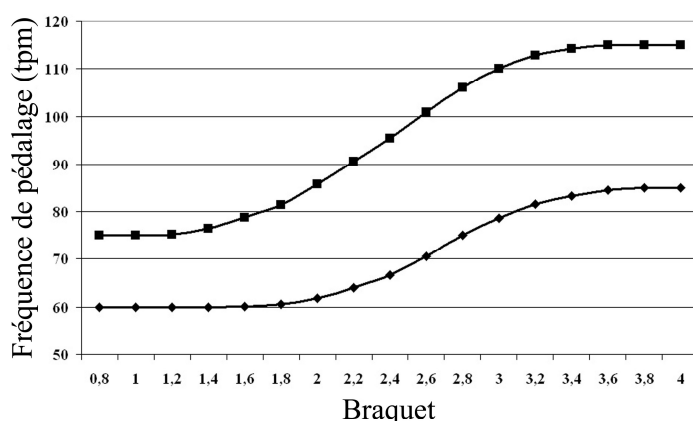


Figure 14.12. Fréquence de pédalage en fonction du braquet utilisé par Maurice. En haut fréquence maximale, en bas fréquence minimale.

Tout se passe comme si la balance du compromis, cité plus haut, entre la force et la vitesse d'exécution du mouvement, variait en fonction de la résistance « sous la pédale ». Le compromis est plutôt en faveur de l'économie, donc d'une relative lenteur, avec les petits braquets, sur les routes pentues ou difficiles. Il penche plutôt en faveur du confort, donc d'une relative célérité avec les plus grands braquets, dans les descentes ou vent de dos. Ce sont les sensations perçues par les membres inférieurs qui font l'arbitrage. C'est d'autant plus vrai que le cyclotouriste est plus expérimenté et qu'il se fait confiance. À un niveau de fréquence plus élevé, on pourrait faire un constat parallèle pour les coureurs.

14.3.5. INCONSTANCE DE LA FRÉQUENCE DE PÉDALAGE

14.3.5.1. La fréquence de pédalage change presque tout le temps

Sauf dans certaines circonstances, le rythme de pédalage varie constamment. Ce qu'un amoureux de l'effort cycliste prolongé privilégie, inconsciemment ou viscéralement, c'est le niveau et la stabilité de son rythme cardiaque. Il joue, pour maîtriser les pulsations cardiaques et donc son débit d'énergie, sur sa fréquence de pédalage et sur les deux manettes des dérailleurs. C'est là que l'on retrouve toute la science, toute la maîtrise, toute la « patte » du pédaleur. Pour s'en convaincre, il suffit d'installer sur le cintre un compteur avec fréquence cardiaque et cadence de pédalage et de comparer les données affichées à ses sensations !

Il n'y a que dans les cols, surtout longs et durs, que fréquences cardiaque, respiratoire et de pédalage tendent à devenir stables de concert. L'art de l'escalade, même en compétition quand c'est possible, c'est de rechercher et de trouver la bonne cadence. Comme si une synchronisation des fonctions de l'organisme était nécessaire pour l'obtention d'un bon rendement. Cycles respiratoires, battements cardiaques, contractions musculaires... tendent à accorder leurs fréquences. Le seul élément variable devient le braquet.

Les travaux en laboratoire confirment ce que nombre de cyclistes savent d'expérience : dans les grands cols, la fréquence de pédalage spontanée (et optimale) est, à certains moments, liée à la fréquence respiratoire. D'ailleurs l'initiation de la phase d'expiration intervient souvent et régulièrement au cours de la phase d'extension de l'un ou l'autre membre inférieur, l'un ou l'autre selon que l'on est droitier ou gaucher...

Il y a des propositions d'explications théoriques à ce constat. L'augmentation de la fréquence de pédalage induit une plus forte production de CO_2 et donc une augmentation de la fréquence respiratoire. Il existe probablement un traitement coordonné, par le système nerveux, entre les informations des mécanorécepteurs des membres inférieurs et ceux de l'appareil respiratoire...

14.3.5.2. Et la vitesse de la pédale n'est pas constante sur une rotation du pédalier

Notons ici que la vitesse de la pédale, sur un tour de révolution autour de l'axe du pédalier, n'est pas constante, contrairement aux apparences. Il a été constaté en laboratoire que la vitesse de rotation du pédalier est plus importante (très légèrement) quand la pédale est en avant et en arrière. L'explication en est simple : la vitesse est plus rapide au moment où la force exercée est la plus importante, c'est-à-dire vers 90° . La variation de force, alors que les résistances sont constantes, crée une accélération.

Sur la route, ce phénomène n'est pas perçu parce qu'il est limité par le rôle très important de l'énergie cinétique de translation (voir 11.4.2). Mais il existe très certainement. En effet, les frottements, la pente, tendent à ralentir le cycliste (consomment de l'énergie cinétique) et celui-ci relance en permanence l'allure (recrée de l'énergie cinétique) au moment où il est le plus efficace, c'est-à-dire vers 60° à 90° . Les pédales étant opposées de 180° , l'accélération touche aussi la pédale quand elle est en arrière, vers 240° à 270° de rotation.

14.3.6. FRÉQUENCE DE PÉDALAGE, LONGUEUR DES MEMBRES INFÉRIEURS ET LONGUEUR DES MANIVELLES

La fréquence de pédalage dépend donc de la nécessaire relaxation intermittente des muscles permettant leur relatif repos, l'irrigation artérielle et le retour veineux. Elle dépend aussi des perceptions du cycliste, notamment de la sensation de confort, ou de non-douleur, que lui procure telle ou telle fréquence. Enfin, elle dépend beaucoup de l'entraînement, qui améliore la qualité et la coordination des muscles du pédalage.

Ce qui régule l'effort du cycliste c'est, d'une part, la force F qu'il peut ou veut bien appliquer sur la pédale pour s'opposer aux résistances à vaincre F_v et, d'autre part, la puissance qu'il peut ou veut développer, c'est-à-dire la vitesse à laquelle il peut ou veut appliquer cette force F .

Nous connaissons la relation entre les deux forces [$F = F_v \times Br \times C_{rm}$] et la relation entre la vitesse de déplacement du cycliste et sa fréquence de pédalage [$V = f_p \times Br \times C_r$].



Pendant sa montée du Ventoux depuis Bédoin, en 2 h 15, Thérèse roule à 8,9 km/h, soit 2,47 m/s. La somme des résistances à vaincre est de 58,5 N. Elle développe une puissance de 144 w. Avec ses manivelles de 160 mm et son braquet de 26/25, $\langle F \rangle = 120$ N (12,2 kg). Sa fréquence de pédalage est de 72 tpm.

Nous avons vu (en 8.3.4) que la longueur M des manivelles conditionnait d'une manière impérative le travail des articulations du membre inférieur, surtout celui du genou, et nous verrons au chapitre suivant (en 15.2.1) comment on peut déterminer la bonne longueur des manivelles. Que se passe-t-il, au niveau de la performance du cycliste, si la longueur des manivelles change ? Y-a-t-il un réel désavantage mécanique à avoir de petites manivelles ?



Il y a quelques années, la veille d'une de leurs ascensions du Ventoux, Maurice, sans rien lui dire, avait monté des manivelles de 160 mm sur le vélo de Thérèse, au lieu des 165. Le lendemain, Thérèse le doublait avec aisance et désinvolture : « Qu'as-tu fait à ma randonneuse ? J'ai l'impression d'être en grande forme ! »

Tout d'abord, la force d'appui sur la pédale et la puissance développée restent, ou peuvent rester, identiques. Si la puissance développée est égale aux forces à vaincre multipliées par la vitesse de déplacement du cycliste sur la route, elle est aussi égale à la force moyenne sur la pédale multipliée par la vitesse de déplacement de la pédale sur son cercle de révolution. Cette vitesse de la pédale ne varie donc pas. Or elle est égale à $f_p \times M \times 2\pi$. Ce qui change c'est la fréquence de pédalage, qui est inversement proportionnelle à la longueur des manivelles, et le braquet, qui varie proportionnellement à la longueur des manivelles.

Les petits ont des petites manivelles pour respecter leurs genoux. Ils sont plus véloce que les grands qui peuvent utiliser de longues manivelles. La plus grande célérité liée aux petites manivelles est facilitée par la plus faible inertie du système de pédalage, comme nous l'avons vu (en 11.3.2, 11.3.3.3 et 11.4.2).



Repensant à l'épisode cité plus haut, Thérèse réfléchit à ce que donneraient différentes longueurs de manivelles dans le Ventoux, tout en développant la même puissance (149 w) et la même force d'appui sur la pédale (124 N) :

- Avec 155 mm : $f_p = 74,3$ tpm et braquet = 1,01 (à peu près 26/26)
- Avec 165 mm : $f_p = 69,8$ tpm et braquet = 1,07 (à peu près 26/24)
- Avec 170 mm : $f_p = 67,7$ tpm et braquet = 1,11 (à peu près 32/29)

Elle se dit qu'elle a trouvé le bon compromis (son Maurice a eu raison, encore une fois).