

Chapitre 11.

L'ÉNERGIE MÉCANIQUE

« *Aucun corps ne se met en mouvement ou revient au repos par lui-même* » Ibn SINA (connu en Occident sous le nom d'AVICENNE), médecin et philosophe iranien (980 – 1037).

Vous avez compris depuis plus de 100 pages que la réflexion menée dans ce « traité de biomécanique du cyclisme » n'est pas celle d'un physicien, mais celle d'un médecin ayant quelques prétentions en anatomie, en physiologie et connaissant par la théorie, l'expérience clinique et la pratique personnelle certains gestes sportifs, notamment ceux des cyclistes.

Les définitions ou remarques proposées ne sont pas celles qu'aurait pu donner ou faire Richard Phillips FEYNMAN, prix Nobel de physique en 1965. Ce sont celles d'un pratiquant sybarite, séduit par l'intelligence et la pédagogie de ce physicien et qui aimerait partager le plaisir qu'il a de pédaler et de comprendre ce qu'il fait. Les notions développées se satisfont d'être sommaires. L'important est de savoir comment elles sont entrées dans le capital intelligent de l'humanité et pourquoi elles peuvent mener à une bonne appréhension du geste cycliste.

11.1. DÉFINITIONS

11.1.1. L'ÉNERGIE

Citons justement R. P. FEYNMANN : « *Dans la physique d'aujourd'hui, nous n'avons aucune connaissance de ce qu'est l'énergie* ». Nous voilà bien partis ! Ce que l'on peut tout de même affirmer, c'est qu'il s'agit d'une caractéristique de l'état d'un système. L'énergie est une propriété de toute matière et l'on ne peut l'observer qu'indirectement par des variations de position, de masse, de vitesse... L'énergie se quantifie en joules ou en calorie, nous y reviendrons à propos du travail, ci-dessous. Elle apparaît sous un très grand nombre de formes différentes. Citons quelques exemples.

- L'énergie potentielle gravitationnelle est liée au poids. Elle est, par exemple, gênante dans la montée d'un col mais tout à fait plaisante dans la descente.
- L'énergie cinétique est liée au mouvement. Elle nous oblige à freiner, par exemple.
- L'énergie mécanique est la somme de l'énergie potentielle gravitationnelle et de l'énergie cinétique.
- L'énergie thermique est produite, par exemple, par le frottement des freins sur les jantes, par les frottements des pneus avec la route, par les frottements avec l'air ou par (le mauvais rendement de) la combustion des aliments dans notre organisme.
- L'énergie élastique est celle de nos pneus, qui amortissent les chocs et les vibrations venant de la route, celle des ressorts des dérailleurs et des freins, ou celle des muscles. Elle joue un rôle important chez le cycliste, nous en reparlerons à la fin de ce chapitre
- L'énergie électrique est fournie par des piles ou par l'alternateur sous la boîte de pédalier.
- L'énergie chimique est, par exemple, procurée par les mécanismes biochimiques de la digestion.
- L'énergie de rayonnement est, par exemple, un des moyens de dissipation de la chaleur en excédant lors de l'effort sportif, ou la cause de la chaleur fournie par le soleil sur notre peau.
- L'énergie nucléaire n'est pas encore utilisée par les cyclistes sauf pour alimenter en électricité certains outils nécessaires à l'entretien de la bicyclette.
- L'énergie de masse a été mise en évidence par Albert EINSTEIN et son épouse, en 1905. Tout le monde connaît sa célèbre formule $E = m.c^2$. Toute particule de masse m possède, au repos, une énergie E égale à m multipliée par le carré de la vitesse de la lumière dans le vide. Un objet a de l'énergie du fait de sa simple existence.





L'énergie de masse de la randonneuse de Maurice est de $11,5 \text{ kg} \times (3.10^8)^2 = 34,5.10^{16} \text{ J}$. C'est une véritable méga-bombe ! C'est même l'équivalent de 3.500 bombes comme celle d'Hiroshima !

11.1.2. LE TRAVAIL

Le travail est la variation de l'énergie d'un système due à l'application d'une force, agissant sur une distance. En mécanique, il s'agit donc d'un mouvement s'exerçant contre une résistance, que celle-ci soit la pesanteur, un frottement, l'inertie...

$$\text{Travail} = \text{Force} \times \text{distance}$$

L'unité de travail est le newton-mètre (N.m) ou le joule (J) qui correspond à une force de 1 newton déplaçant un corps de 1 mètre. On utilise fréquemment une autre unité, la calorie. Une calorie est égale à 4,186 joules et 1 kilocalorie est donc égal à 4.186 joules. Sur route plate, à vitesse constante, la résistance est liée aux seuls frottements. Nous reverrons tout cela au chapitre 12. En attendant, prenons un exemple.



La route qui longe, pendant 16 km, le canal de Caen à la mer est plate. Mais Maurice est bien obligé d'appuyer sur les pédales pour avancer.

À 22,5 km/h, sans vent, la force de résistance, liée aux seuls frottements, est de 16 newtons.

Le travail effectué de Caen à la mer est donc égal à quelques 256.000 joules.

C'est l'équivalent de l'énergie fournie par la combustion de près de 250 allumettes.

En montagne, dans la grimpe d'un col, ou dans la simple montée d'une côte dans le Perche, la force de résistance cumule les effets de la pesanteur et, beaucoup plus accessoirement, des frottements (chapitre 12).



Maurice hisse carcasse, randonneuse et sacoches de guidon, de Bédoin au sommet du Ventoux.

Travail contre la pesanteur = masse totale (86 kg) \times 9,81 \times dénivelée (1.634 m) = 1.378.540 J.

Travail contre les frottements = 133.600 J.

Au total, le Ventoux depuis Bédoin « coûte » à Maurice 1.512.140 J, soit 361 kcal.

Soit l'équivalent, en énergie, de l'explosion d'environ 1,5 kg de TNT !

11.1.3. LA PUISSANCE

La puissance correspond à la cadence du travail effectué ou plus généralement à la cadence à laquelle l'énergie est transformée d'une forme à une autre, ou transférée d'un système à un autre. C'est un débit d'énergie. On peut l'exprimer selon la formule :

$$\text{Puissance} = \text{Travail effectué} / \text{intervalle de temps}$$

La puissance P s'exprime en watt (w). Un watt = un joule / seconde. Il est un autre moyen de calculer la puissance. Il s'agit d'un travail effectué par intervalle de temps, c'est à dire d'une force qui s'exerce sur une distance, pendant un temps donné, soit à une certaine vitesse. On peut donc utiliser la formule suivante :

$$\text{Puissance} = \text{Force} \times \text{vitesse}$$



De Caen à la mer, à 22,5 km/h, il faut à Maurice 42 minutes et 40 secondes.

Il fournit donc une puissance de 100 watts (256.000 J / 2.560 s).



Quand Maurice grimpe le Ventoux en deux heures et trente minutes, il fournit une puissance de 168 watts (1.512.140 J / 9.000 s). S'il prend son temps et réalise son escalade en trois heures, il ne fournit plus que 140 watts (1.512.140 J / 10.800 s), ce qui n'est déjà pas si mal.



À l'entraînement, Kevin grimpe le Ventoux depuis Bédoin en une heure et quart.

Avec ses 75 kg, vélo compris, il a effectué un travail de 1.397.250 joules (dont 195.034 en frottements) et développé une puissance de 310 watts.

Pour situer les choses, prenons un autre exemple très quotidien :



Maurice monte tranquillement les trois étages qui le mènent à son appartement (7,5 m de dénivellée).
Travail effectué = $70 \text{ kg} \times 9,81 \times 7,5 \text{ m} = 5.150 \text{ J}$.
En 30 secondes, il est devant sa porte. Puissance développée = $5.150 / 30 = 172 \text{ w}$.
Il a oublié sa clé de voiture et remonte, quatre à quatre, en 13 s.
Puissance développée = 396 w. Mais il est essoufflé et n'aurait pas tenu plus des trois étages.

11.1.4. CONSERVATION DE L'ÉNERGIE

Henri POINCARÉ : « *Comme nous ne pouvons pas donner une définition générale de l'énergie, le principe de conservation de l'énergie veut dire simplement qu'il y a quelque chose qui reste constant. Quelles que soient les nouvelles notions que des expériences futures peuvent nous donner, nous savons d'avance qu'il y aura toujours quelque chose qui reste constant et que nous pourrions appeler énergie* ».

C'est une loi de la nature, un fait. Il n'y a pas d'exception connue à cette « loi de conservation de l'énergie ». Il y a une certaine quantité que nous appelons énergie, qui ne change pas dans les multiples modifications que peut subir la nature. L'énergie totale de tout système isolé du reste de l'Univers reste constante, mais l'énergie peut être transformée d'une forme à une autre à l'intérieur du système. Ainsi, le cycliste produit de l'énergie par les mécanismes chimiques de son métabolisme et par la mise en jeu de son appareil locomoteur. Cette énergie libérée se transforme en énergie potentielle et/ou en énergie cinétique qui permettent de lutter contre la force gravitationnelle et les frottements. Pour l'instant, attachons-nous à ces deux énergies, qui définissent l'énergie mécanique. Nous examinerons le problème des frottements dans le chapitre 12.



11.2. L'ÉNERGIE POTENTIELLE GRAVITATIONNELLE



Maurice range une bouteille dans un placard situé au-dessus de l'endroit où est posé son vélo. La bouteille glisse de ses mains et vient atterrir sur le garde-boue arrière de la randonneuse. Bouteille éclatée, vin perdu, garde-boue cabossé.

L'énergie nécessaire pour faire éclater la bouteille et déformer le garde-boue est due à l'interaction gravitationnelle entre la terre et la bouteille (mais aussi à l'énergie cinétique acquise pendant la chute, nous y reviendrons) : le système déformable (terre-bouteille) possède de l'énergie potentielle de pesanteur, bien conservée tant que la bouteille est dans son casier. Le garde-boue sera d'autant plus cabossé que la bouteille tombe de plus haut : l'énergie potentielle de pesanteur augmente avec la distance qui sépare la terre de la bouteille. L'énergie potentielle E_{PG} d'un système terre-solide est donnée par la formule :

$$E_{PG} = m \times g \times h$$

dans laquelle m est la masse du solide (en kg), g l'intensité de la pesanteur (= 9,81 newton/kilogramme) et h l'altitude du centre de masse du solide (en mètre).



Maurice passe la nuit à Bédoin (275 m). Il dort comme un loir, sa randonneuse sur la descente du lit. Par rapport au niveau de la mer, ils ont une énergie potentielle de $86 \times 9,81 \times 275 = 232.007 \text{ J}$.

Ce qui nous intéresse, c'est la variation de l'énergie potentielle qui ne dépend pas du niveau d'origine de l'altitude, mais dépend de la variation de cette altitude. On peut donc choisir le bas d'une côte comme point de départ des calculs.



Quatre heures du matin ! Maurice saute de son lit et enfourche sa randonneuse. Vers 6 h 30, il est au sommet du Géant de Provence (1.909 m). Le jour se lève.

E_{PG} (par rapport à Marseille) = 1.610.547 J. Par rapport à Bédoin, elle a augmentée de 1.378.540 J. S'il descend par Sault (780 m) il libérera 952.492 J et gardera 426.048 J en stock, qu'il finira de consommer en rentrant à Bédoin par les gorges de la Nesque.

Pendant la descente, cette débauche d'énergie se transforme en énergie cinétique que nous allons examiner ci-dessous. Mais en partie seulement, car elle est aussi consommée dans les frottements, surtout avec l'air et au niveau des freins. Nous allons y revenir très bientôt, dans le chapitre suivant.



Dans la descente vers Bédoin, la route est superbe mais sinueuse et la vitesse très élevée. Maurice relève son buste pour augmenter les frottements avec l'air.

Et il freine, libérant ainsi un excédent d'énergie cinétique sous la forme d'énergie thermique.

Dans la technique du pédalage en danseuse, il y a en plus un mouvement oscillant du centre de gravité du cycliste par rapport à la route et au vélo, à chaque tour de pédale. Ce mouvement nécessite de créer une petite quantité d'énergie potentielle, qui est en partie restituée pour appuyer sur la pédale qui descend en avant. Ce n'est pas grand-chose mais ça compte d'autant plus que ça se répète. Nous y reviendrons à la fin de ce chapitre et au chapitre 17, à propos de la marche dans laquelle se produit un phénomène identique.



Admettons que le centre de gravité de Maurice en danseuse se hisse de 2 cm à chaque demi-tour de pédale : $70 \times 9,81 \times 0,02 = 13,7$ joules à chaque fois. Comme il faut environ 10.000 tours de pédale pour grimper le Ventoux, il est préférable de rester assis le plus possible.

11.3. L'ÉNERGIE CINÉTIQUE

Imaginons un cycliste qui fonce droit sur un mur. Il va se faire mal et va abîmer son vélo. Pour se casser la clavicule, tordre la fourche et mettre la roue avant en 8, il faut de l'énergie ! Elle vient de la masse en mouvement (cycliste + vélo) et se libère quand le mur interrompt la trajectoire. Tout corps en déplacement possède de l'énergie du seul fait de son mouvement : c'est l'énergie cinétique. Essayons de l'identifier et de la quantifier. À cause des modalités de calcul, on fera une distinction, entre les mouvements de translation et de rotation et on assimilera le cycliste et sa randonneuse à un corps solide. Si le calcul de l'énergie cinétique de translation est aisé (11.3.1) celui de l'énergie cinétique due aux rotations est plus complexe. Pour ceux que ça rebute, proposons donc de survoler les paragraphes 11.3.2 et 11.3.3 pour arriver directement aux résultats, en 11.3.3.4 et 11.3.4. Ils verront l'importance relative de l'énergie cinétique de translation et de l'énergie cinétique due aux rotations. Cela leur donnera peut-être envie de revenir tranquillement en arrière.

11.3.1. ÉNERGIE CINÉTIQUE DE TRANSLATION DU CYCLISTE ET DE SON VÉLO






Figure 11.1. Énergie cinétique de translation. Facile à calculer, elle joue un rôle essentiel.

Dans le mouvement de translation, une ligne joignant deux points quelconques du corps reste parallèle à elle-même. Si le déplacement s'effectue sur une droite, le mouvement est rectiligne, sur une courbe, il est curviligne. On peut dire, en première approximation et en négligeant pour l'instant les virages, que le cycliste et son vélo effectuent, par rapport à la route, un mouvement de translation, que ce soit en compétition, en randonnée ou pour aller chercher son pain. Le calcul de l'énergie cinétique E_K est, dans ce cas, très simple. Elle est égale au demi-produit de la masse m par le carré de la vitesse v :

$$E_K = 1/2 m \times v^2$$

Elle est donc d'autant plus importante que la masse est plus élevée et surtout la vitesse plus grande. L'énergie cinétique de translation s'exprime en joules (J), quand m est exprimé en kg et v en m/s.

				
En Normandie	Vitesse (km/h)	22,5	22,5	40
	E_K de translation (J)	1.680	1.260	4.630
Dans l'ascension du Mont-Ventoux	Vitesse (km/h)	8	8,9	16
	E_K de translation (J)	212	197	741

Cette énergie cinétique permet de lutter contre les frottements, de l'air surtout, mais aussi de la bicyclette, voire des articulations du cycliste. À chaque instant, ceux-ci consomment une partie de l'énergie cinétique, qu'ils transforment en chaleur. La masse restant stable, la vitesse diminuerait si le cycliste ne reconstituait pas, au fur et à mesure, son énergie cinétique. Pour ne pas s'arrêter progressivement, il recrée donc en permanence sa vitesse, en appuyant sur les pédales ou en convertissant son énergie potentielle gravitationnelle, en dépensant donc sa propre énergie mécanique.



Dans la descente du Ventoux, Maurice n'a pas donné un seul coup de pédale.

E_K s'est élevée à 18.963 J au moment d'une pointe à 75,6 km/h.

Pour prendre le virage suivant, à 28,7 km/h ($E_K = 2.733$ J), Maurice a dû freiner et libérer : $18.963 - 2.733 = 16.230$ J, sous forme de chaleur. L'équivalent de la combustion de 16 allumettes !

11.3.2. ÉNERGIE CINÉTIQUE DUE AUX ROTATIONS

Si, pendant un mouvement, la droite joignant deux points quelconques ne reste pas parallèle à elle-même, il y a mouvement de rotation. Celui-ci s'effectue autour d'un axe perpendiculaire au plan du mouvement. C'est le cas du pédalier autour de l'axe du pédalier et des roues autour de l'axe des moyeux. C'est aussi le cas des segments corporels autour de leurs articulations.

La formule utilisée pour le calcul de l'énergie cinétique d'un solide en rotation est « parallèle » à celle employée pour le calcul de l'énergie cinétique de translation. L'énergie cinétique est égale au demi-produit du moment d'inertie I (voir en 10.2.1) par le carré de la vitesse angulaire ω :

$$E_K = 1/2 I \times \omega^2$$

Elle s'exprime, là aussi, en joules, quand le moment d'inertie est exprimé en kgm^2 et la vitesse angulaire en radians/s. Rappelons que $1 \text{ radian} = 360^\circ / 2\pi = 57,3^\circ$.

Calculons maintenant l'énergie cinétique de rotation. Elle est d'autant plus grande que la masse m en rotation est plus élevée, et surtout, d'une part, que la répartition de cette masse, exprimée par le rayon de giration k (10.2.2) est plus éloignée de l'axe de rotation et que, d'autre part, la vitesse angulaire ω est plus grande.

$$I = m \times k^2 \text{ d'où } E_K = 1/2 \times m \times k^2 \times \omega^2$$

Ainsi, à vitesse de rotation égale, l'énergie cinétique d'une petite roue (par ailleurs plus légère) est plus faible que celle d'une grande roue. Il en va de même pour un pédalier avec des petits plateaux.

Pour effectuer les calculs ci-dessous, se reporter aux calculs concernant les moments d'inertie (en 10.2.3). La vitesse de Maurice est toujours la même (22,5 km/h) et il utilise un braquet de 43/17.



Figure 11.2. Énergie cinétique due aux rotations. Difficile à calculer, elle ne joue cependant qu'un rôle accessoire.



Roues	Vitesse angulaire = 3,24 tours par seconde, soit 20,4 rad/s.
	E_K de rotation de la roue avant = $0,5 \times 1,13 \times 0,27^2 \times 20,4^2 = 17$ joules E_K de rotation de la roue arrière = $0,5 \times 1,62 \times 0,24^2 \times 20,4^2 = 19$ joules
Pédalier	Vitesse de rotation = 77 tours par minutes, soit 8 rad/s.
	E_K de rotation du pédalier et des pédales = $0,5 \times 1,14 \times 0,13^2 \times 8^2 = 0,6$ joules
L'énergie cinétique de la chaîne, que le pédalier met en mouvement, est négligeable.	

Les valeurs de l'énergie cinétique de rotation des roues et du pédalier sont faibles, par rapport à l'énergie cinétique de translation, parce que les masses en jeu sont moins importantes (3,89 kg sur un total de 86 kg, soit 4,5 %) et parce que le poids des éléments en rotation reste proche de l'axe de rotation. Mais on avait déjà remarqué qu'il est beaucoup plus facile de se mettre en roue libre que d'arrêter sa bicyclette, en pleine vitesse.

Notons ici que tout le déplacement du cycliste peut être assimilé à une translation, même dans un virage.



Supposons que Maurice prenne une courbe de 50 m de rayon, à 22,5 km/h.

Appliquons la formule $E_K = 1/2 \times m \times v^2$.

Le rayon de giration est égal au rayon du virage, puisque toute la masse est représentée par le cycliste et son vélo, la vitesse angulaire est de 7,16 °/s, soit 0,125 rad/s.

$E_K = 0,5 \times 86 \times 50^2 \times 0,125^2 = 1.680$ joules ! C'est exactement ce que nous avons trouvé plus haut.

Pour avoir l'énergie cinétique totale, il faut, maintenant, calculer celle des dernières « pièces » en mouvement, les segments des membres inférieurs.

11.3.3. ÉNERGIE CINÉTIQUE DUE AUX MOUVEMENTS DES MEMBRES INFÉRIEURS

11.3.3.1. Énergie cinétique de la cuisse

La cuisse est en rotation autour de l'axe de flexion-extension de la hanche. Elle oscille, absorbant et libérant, tour à tour, de l'énergie cinétique. Le calcul de son énergie cinétique utilise les formules vues plus haut, pour les corps en rotation ($E_K = 1/2 I \times \omega^2$ et $I = m k^2$). Pour ce qui est des vitesses angulaires ω des articulations et des moments d'inertie, reportez-vous aux chapitres 2 (en 2.3.2.2) et 10 (en 10.2.3).



Rotation du pédalier	Vitesse angulaire ω	Énergie cinétique E_K
Vers 20° et 180°	0	0
Vers 90°	192°/s ou 3,35 rad/s.	$0,5 \times 0,435 \times 3,35^2 = 2,44$ joules.
Vers 300°	163°/s ou 2,84 rad/s	$0,5 \times 0,435 \times 2,84^2 = 1,75$ joules

11.3.3.2. Énergie cinétique de la jambe

La jambe suit un double mouvement qui est à la fois de translation et de rotation, ainsi que l'illustre le kinogramme présenté au chapitre 2 (figure 2.12). Le mouvement de translation est provoqué par la flexion-extension de la hanche. La vitesse du segment « jambe » y est nulle, ou maximale, en même temps que la vitesse angulaire de la hanche. Le mouvement de rotation se déroule autour de l'axe de flexion-extension du genou. Vers 20° et 180° de rotation de la pédale, cet axe est immobile mais la jambe tourne autour.



E_K du mouvement de translation de la jambe	Vers 20 et 180° (genou immobile) = 0. Vers 90°, $E_K = 3,5$ joules. Vers 300°, $E_K = 2,6$ joules.
E_K du mouvement de rotation de la jambe	Vers 20°, $E_K = 0,6$ joules. Vers 90°, E_K est maximale = 2,2 joules. Vers 180°, $E_K = 0,4$ joules.

11.3.3.3. Énergie cinétique du pied et de la chaussure

Le pied suit la rotation de la pédale autour de l'axe du pédalier. On admettra que sa trajectoire est circulaire. On négligera le mouvement de rotation du pied autour de la cheville qui ne fournit quasiment pas d'énergie cinétique. Admettons que la masse du pied et de la chaussure est entièrement située sur le cercle de rotation de la pédale. Le rayon de giration est donc égal à la longueur de la manivelle.



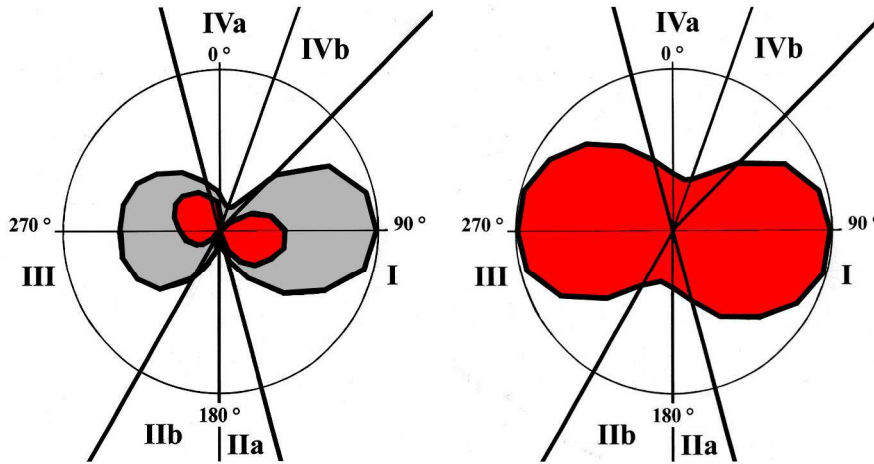
Masse du pied = 1,015 kg. Masse d'une chaussure = 0,455 kg. Pied + chaussure = 1,47 kg.

Moment d'inertie = $1,47 \times 0,17^2 = 0,042$ kgm².

$E_K = 0,5 \times 0,042 \times 8^2 = 1,4$ joules.

11.3.3.4. Illustrations

Selon la révolution de la pédale, l'énergie cinétique des segments des membres inférieurs varie donc, comme le montre les deux graphiques 11.3 et 11.4. Pour bien les lire, comme pour les figures du chapitre 7 (figures 7.20 à 7.24, 7.31, 7.34 et 7.35), imaginez que vous regardez un pédalier du côté droit : à 0°, la pédale est en haut, à 90° elle est en avant...



Figures 11.3 et 11.4. Energie cinétique due aux mouvements des membres inférieurs. A gauche : cuisse (grisé foncé) + jambe (grisé clair) d'un seul coté. A droite : la somme de l'énergie cinétique des deux membres inférieurs.

Le premier (figure 11.3) à gauche montre comment l'énergie cinétique de la cuisse (en rouge) et celle de la jambe (en grisé clair) varient. Le deuxième graphique (figure 11.4) à droite, sur le même principe que le précédent, montre comment la somme cuisse + jambe + pied, des deux cotés, évolue au cours du cycle de pédalage. Notons enfin ici, que l'augmentation de la fréquence de pédalage, par de plus petits braquets, accroît la quantité d'énergie cinétique. Nous y reviendrons au chapitre 14 (en 14.3.6).

Pédalage, à 22,5 km/h, braquet de 43/17 : Quelle est l' E_K des deux membres inférieurs ?



Elle est minimale vers 10-20° et 190-200° (= environ 5 J) assurée par la rotation continue du pied et par le décalage des mouvements de rotation de la hanche et du genou.

Elle est maximale vers 90-120° et 270-300° (= environ 16 J).

De 10-20 à 90-120°, Maurice crée une énergie d'environ 10-11 J, en appuyant sur la pédale. De 90-120 à 190-200°, l'énergie « engrangée » est restituée et contribue à la rotation de la pédale.

11.3.4. ÉNERGIE CINÉTIQUE TOTALE

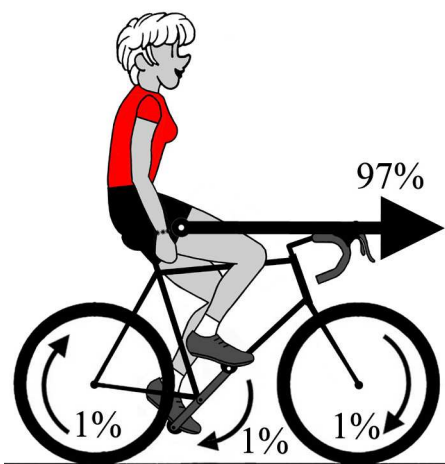


Figure 11.5. Toutes les énergies cinétiques d'un cycliste et de son vélo. C'est bien la translation qui joue le rôle le plus important.

L'énergie cinétique totale du cycliste et de son vélo est égale à la somme de toutes leurs énergies cinétiques de translation, de rotation ou mixtes. Ainsi, à une vitesse moyenne (22,5 km/h environ) :

- La translation du couple bicyclette-cycliste représente 97 % de l'énergie cinétique totale.
- Chaque roue ne compte que pour environ 1 %.
- Tout le système de pédalage (membres inférieurs + pédalier + pédales + chaîne + roulettes de dérailleur + cassette de la roue libre + pignons) fournit le 1 % restant, quand le cycliste n'est pas en roue libre...

Quand la vitesse augmente, la part de l'énergie cinétique fournie par la translation augmente avec le carré de la vitesse et la part du système de pédalage diminue, notamment parce qu'on prend un braquet plus grand et qu'on n'augmente pas dans les mêmes proportions la fréquence de pédalage. Mais qu'importe, il s'agit ici d'avoir un ordre de grandeur.

11.4. UTILITÉ DU POIDS ET DE L'ÉNERGIE CINÉTIQUE

11.4.1. LE POIDS : ATOUT ET HANDICAP

11.4.1.1. Le poids d'ensemble

Le travail fourni en montée est fonction, d'une part du poids du cycliste et de son vélo, d'autre part de la dénivellée positive réalisée, et accessoirement des frottements. Plus le poids est élevé, plus la quantité d'énergie dépensée (transformée plus exactement) est importante. Mais plus grande est la quantité d'énergie potentielle accumulée par le système au sommet de l'ascension. Être lourd pourrait ne pas être, quelquefois, un handicap, par exemple, dans un parcours vallonné sur lequel il n'y a pas besoin de freiner. Mais le plus souvent, c'est un inconvénient car il oblige à un important transfert d'énergie à la montée, et surtout à un fréquent gaspillage du capital énergétique (E_{PG}) à la descente dans les frottements et dans un freinage inéluctable (nous calculerons tout ça au chapitre suivant).

Tout compte fait, il vaut mieux être léger, surtout en montagne, cela permet moins de dilapidation de l'énergie produite. On en verra une illustration, à propos des frottements dans le chapitre suivant.

Les cyclotouristes expérimentés savent thésauriser l'énergie potentielle gravitationnelle à moindres frais. Ils utilisent pour cela de petits braquets et une cadence de pédalage optimale (nous verrons cela au chapitre 14). Ils savent aussi que rien ne se perd et qu'ils toucheront les bénéfices à la descente. Au sommet, ils se laissent donc souvent aller à savourer leur plein d'énergie potentielle gravitationnelle.

Sur route plate, la variation de l'altitude, et donc de l'énergie potentielle gravitationnelle, est nulle. Nous effectuons pourtant un travail. Celui-ci est dû au maintien de la position, aux frottements des pièces du vélo entre elles, des pneus sur la route et,

surtout, du couple vélo-cycliste avec l'air. Le poids du vélo n'a pas vraiment d'importance si ce n'est dans les changements d'allure (voir en 11.4.2). Celui du cycliste en a plus dans la mesure où la surface de pénétration dans l'air est en relation avec la masse corporelle. En toute rigueur, le poids pourrait avoir une influence sur les frottements avec roulement des pneus sur la route. Mais il est toujours possible de jouer sur la pression dans la chambre à air. Nous y reviendrons au chapitre 12. Par contre le poids va jouer dans l'énergie cinétique du cycliste.



11.4.1.2. Le poids des membres inférieurs

Chaque membre inférieur pèse 17,1 % du poids du corps chez un cycliste (voir en 10.1.1.3). Dans la rotation des pédales autour de l'axe du pédalier, le poids passif du membre qui repose sur la pédale en avant compense le poids du membre qui remonte en arrière.

Dans l'action du pédalage, le membre « en avant » est en extension et appuie sur la pédale, et le membre « en arrière » est en flexion et, dans le meilleur des cas, tire sur la pédale pour la remonter. Si cet effort de remontée en arrière ne servait qu'à hisser le membre, ce serait déjà considérable. Il faut, en effet, une force d'environ 80 N pour soulever le poids « libre » d'un membre inférieur (celui qui n'est pas soutenu « passivement » par la hanche) : nous pourrions comparer avec l'intensité des forces nécessaires au pédalage étudiée dans le chapitre 14 (en 14.1.2). Quel qu'il soit, cet effort de remontée crée de l'énergie potentielle gravitationnelle utilisée dans la phase descendante qui est, nous l'avons vu, la plus efficace.

11.4.2. ÉNERGIE CINÉTIQUE ET TECHNIQUE DE PÉDALAGE

La force de propulsion (F_{MI} , voir en 7.4) variant d'une manière « cyclique » au cours du pédalage, l'allure du cycliste serait saccadée s'il n'y avait pas l'énergie cinétique. La régularité de sa vitesse est essentiellement

assurée par l'énergie cinétique de translation de l'ensemble vélo et pédaleur et, dans une moindre mesure, par l'énergie cinétique de rotation de ses roues. En ce qui concerne les roues, plus la masse est importante et/ou plus elle est située loin de l'axe de rotation, plus l'énergie cinétique de rotation est grande. Dans une tentative de record de l'heure sur piste, le poids du vélo n'est pas une obsession comme dans une course nerveuse ou en montagne. Le pistard qui se lance contre le record de l'heure recherche une vitesse régulière et il est arrivé qu'il n'hésite pas à augmenter l'énergie cinétique de ses roues en les « lestant » à leur périphérie.

11.4.2.1. Énergie cinétique des membres inférieurs

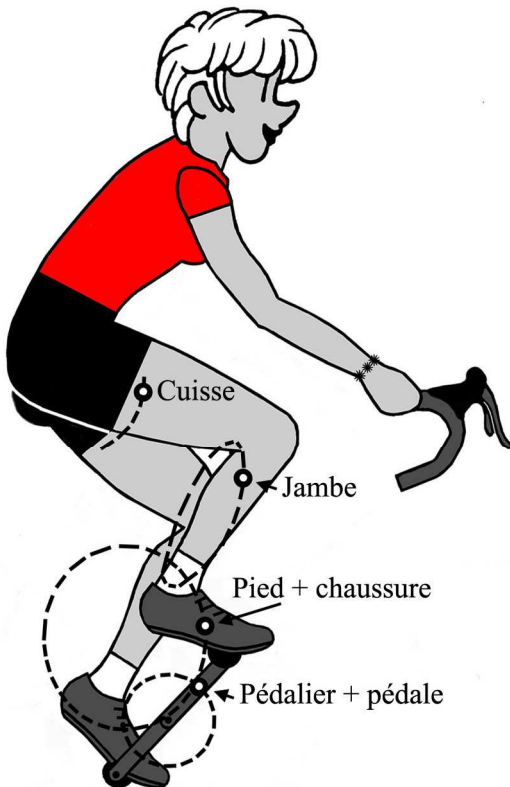


Figure 11.6. Plus le mouvement est circulaire, plus l'énergie cinétique est utile au pédalage.

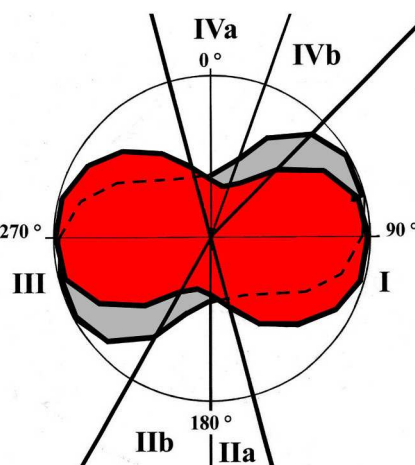
On pourrait penser que l'énergie cinétique accumulée par les différents segments du membre inférieur pendant le pédalage est utile à la continuité du mouvement, même si elle est marginale. Ce n'est pas tout à fait le cas, sauf pour la partie distale du membre, la plus légère, car elle est en rotation régulière autour de l'axe du pédalier, d'autant plus qu'elle est plus éloignée de la racine du membre.

Pour s'en convaincre, jetons un coup d'œil sur la figure 11.6 illustrant les courbes de déplacement des centres de masse de chacun des segments du membre inférieur du cycliste et de l'ensemble pédale manivelle :

- La cuisse n'a pas vraiment d'énergie cinétique utile pendant le pédalage. En effet, celle-ci n'atteint un certain niveau qu'à certains moments du pédalage, quand la vitesse angulaire de l'articulation est la plus grande, c'est-à-dire au cœur des phases d'extension et de flexion. Cette énergie est « restituée » à la cuisse jusqu'aux moments où sa vitesse redevient nulle. Il faut ensuite la recréer. Ce segment ne contribue donc pas, du moins par l'énergie cinétique emmagasinée, aux phases de transition du pédalage.
- La situation de la jambe est intermédiaire entre celle de la cuisse et celle du pied. Elle apporte une faible contribution au pédalage par son énergie cinétique, notamment pendant les phases critiques basse et haute.
- Les segments qui ont une énergie cinétique utile pour la technique du pédalage sont donc formés par le pédalier, la pédale et dans une certaine mesure le pied.

Mais, au total, l'énergie cinétique modérée, due aux mouvements des membres inférieurs est très certainement un élément important à intégrer dans la technique de pédalage, au moins pour en assurer la fluidité et la régularité.

Figure 11.7. Comparaison dans le temps entre l'énergie cinétique des deux membres inférieurs (en rouge) et la force utile sur les deux pédales (grisé clair). Le léger décalage est profitable pour la fluidité et l'efficacité du pédalage.



L'étude de la figure 11.7 apporte de l'eau à notre moulin en mettant bien en évidence que, durant le cycle de pédalage, il existe un décalage entre les minima d'énergie cinétique, ceux que nous avons observés en 11.3.3.4, et les minima d'efficacité de la force de pédalage, longuement étudiés en 7.7.2.

La force efficace sur la pédale (grisé clair) varie au cours du pédalage. Elle est moindre vers 165° (ou 345°), aux moments où hanches, axe du pédalier et axes des pédales sont alignés. De son côté, l'énergie cinétique des deux membres inférieurs (rouge) est minimale vers 200° (ou 20°).

Ce léger décalage, d'environ 30-40°, permet, avec une bonne technique de pédalage bien sûr, que le cycliste « tourne rond » et négocie au moins mal les phases critiques haute et basse. Son allure n'est pas saccadée.

Sur un home-trainer, le cycliste et sa bicyclette ne se déplacent pas. Le frottement avec l'air n'existe donc pas. Mais la rotation des roues et du pédalier et le mouvement des membres inférieurs créent de l'énergie cinétique qui permet de lutter contre les frottements internes, des rouleaux, des pneus sur les rouleaux et de conserver une certaine fluidité aux gestes. On peut même faire varier ces frottements pour moduler l'effort.

11.4.2.2. L'énergie cinétique dans le pédalage en danseuse

Nous avons vu, en 11.2, que le petit mouvement d'oscillation verticale du centre de gravité du cycliste provoqué par cette technique nécessitait la création d'une petite quantité d'énergie potentielle gravitationnelle. Cette énergie est restituée pour appuyer sur la pédale avant, « de tout son poids », c'est le cas de le dire, mais il a bien fallu la créer et sa transformation en énergie cinétique se fait avec des pertes importantes dues aux accélérations et décélérations successives du centre de gravité du corps. Comme le pensait Maurice plus haut, il vaut mieux pédaler le plus souvent assis. Et il vaut mieux pédaler que marcher comme nous le verrons au chapitre 17.

11.4.3. L'ÉNERGIE POTENTIELLE ÉLASTIQUE

L'énergie mécanique se présente sous deux formes : l'énergie cinétique (qui est liée au mouvement) et l'énergie potentielle (qui est liée à la position). Position au sommet du Ventoux avec une belle descente devant soi, mais aussi position des articulations fléchies, avec des muscles étirés qui ne demandent qu'à se raccourcir. Comme on a parlé de l'énergie potentielle gravitationnelle (E_{PG}) qui est, en quelque sorte, une énergie potentielle externe, on peut parler d'une énergie potentielle élastique (E_{PE}) qui est, en analogie, une énergie potentielle interne.

Le muscle est, en effet, un corps élastique. Cette élasticité est quasi parfaite au début de l'étirement et nous avons vu qu'elle est due aux tendons, aux membranes et aux éléments non contractiles du muscle (voir en 7.1.1.2). Elle sert de tampon, protège le muscle, ses tendons et insertions, les ligaments et les leviers osseux lors de brusques changements d'état. Elle permet aussi d'accumuler de l'énergie qui pourra être libérée ultérieurement.

Lors du pédalage, les trois articulations du membre inférieur sont fléchies (en dehors de la période en extension de la cheville) et les muscles de l'extension, notamment mono articulaires sont étirés. Ces gros muscles (le grand fessier par exemple, le quadriceps crural dans ses trois composantes mono articulaires, le soléaire du triceps sural) ont emmagasiné de l'énergie potentielle élastique lors de la flexion du membre inférieur. Ils la libèrent pendant la phase d'extension, à partir de chaque point critique articulaire haut (345° pour le crural et les deux vastes, 20° pour le grand fessier et 45° pour le soléaire) comme nous les avons définis en 2.2.1 puis en 7.6. Au passage critique bas, la hanche et le genou sont encore fléchis, d'une manière modérée, mais l'élasticité des muscles cités plus haut n'est plus utile (l'énergie n'est pas restituée) car ils reprennent un mouvement de raccourcissement pour fléchir à nouveau les articulations.

Dans le pédalage, qui est un mouvement rapide et rythmé, ce phénomène joue un rôle important, notamment pour le franchissement du passage critique haut (7.6.5) et le début de la phase d'extension (7.6.1).