

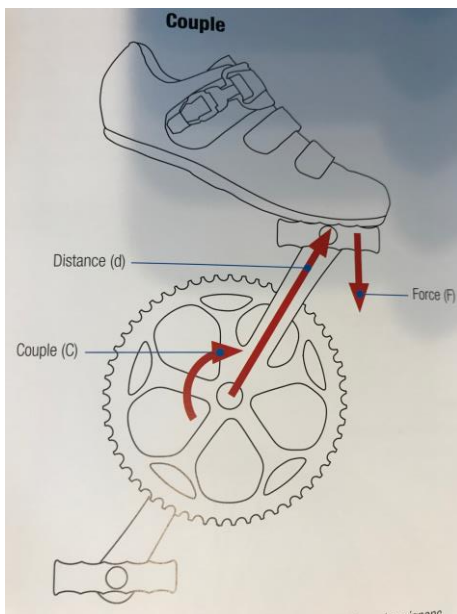
Biomécanique

- Le pédalage -

Sources : *Pratique du cyclisme*. Peter Konopka, Paris, Vigot, 1987.
Cyclisme et optimisation de la performance. F.Grappe, De Boeck, Paris, 2005.
Cyclisme et performance, G.Haushalter, Chiron, Paris, 1990.
La biomécanique en cyclisme. Biologie et médecine du sport, FFC, Paris, 1994.
Pédaler. Sébastien Moussay, Savoir gagner, 2006.
Cyclisme & Science, Max Glaskin, Vigot, Paris, 2015.
Site Internet : http://www.msport.net/newSite/index.php?op=aff_article&id_article=606
<http://www.bikefitting.com/fr/>

Il ne suffit pas d'appliquer une force importante sur les pédales (dimension bioénergétique), il faut aussi l'orienter efficacement (dimension biomécanique et technique) sans quoi il existe une perte de travail mécanique. Comme le mouvement de pédalage est répété des milliers de fois lors d'une compétition qui peut s'étendre jusqu'à 6-7 heures d'effort (entre 30.000 et 40.000 tours), l'efficacité du pédalage entretient des relations avérées avec le niveau de fatigue générale et musculaire. La technique de pédalage (le « coup de pédale ») contribue donc fortement à la performance en cyclisme, et mérite à ce titre de faire l'objet d'un **processus d'optimisation**.

I. La force pour faire tourner les pédales : le couple



Le couple est un travail de forme circulaire : la « force circulaire » que déploie le cycliste pour faire tourner le pédalier s'appelle le **couple**.

Couple = Force (F) X Distance (d)

$C = F \times d$

où : C = couple (en newton-mètre)

F = force (en newtons)

D = distance (en mètres)

La **puissance** développée par le cycliste (en watts) est alors le produit du couple par la vitesse angulaire :

$P_{méca} = C \times \omega$

où : $P_{méca}$ = puissance (en watts)

C = couple (en newton-mètre)

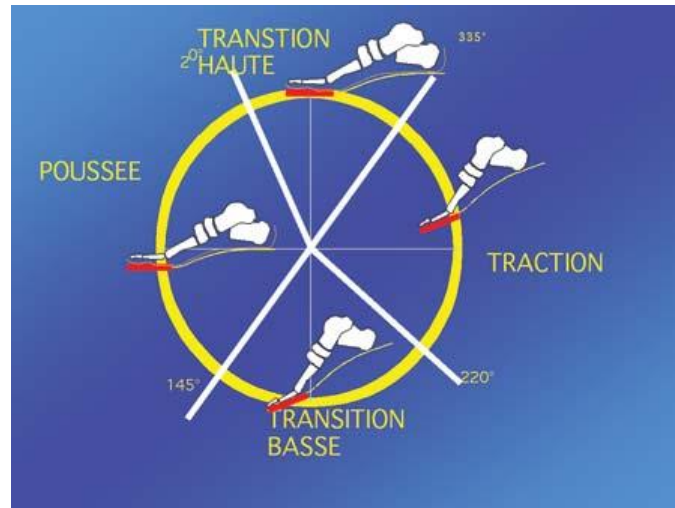
ω = vitesse angulaire (en rad/s)

II. Analyse

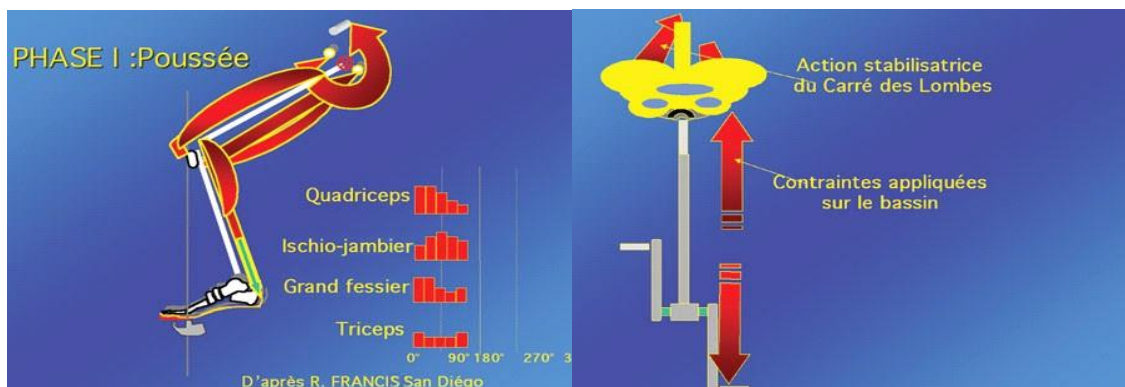
Le mouvement idéal serait celui qui consisterait à faire varier constamment en direction la force exercée sur la pédale, de façon qu'elle soit à chaque instant perpendiculaire à la manivelle (en physique, une force qui agit sur un levier est plus efficace lorsqu'elle agit perpendiculairement à cet levier).

Le mouvement de pédalage est beaucoup plus complexe que ce qu'une analyse superficielle pourrait laisser supposer. Le pédalage est une véritable habileté motrice, dont la maîtrise conditionne **l'efficacité** du déplacement à vélo (c-a-d la combinaison de l'efficacité et de l'économie).

Le mouvement de pédalage est artificiellement décrit en 4 phases qui s'enchaînent les unes aux autres. Les études biomécaniques soulignent l'aspect dynamique (c-a-d participant à la propulsion) de ces 4 phases : on ne parle plus de point mort bas ou haut, mais de zones de moindre efficacité (ou zones de transition). Pour autant, le cycle de pédalage permet, pour chaque groupe musculaire, l'alternance de phases de contraction et de relâchement



Phase 1 (de 20° à 145°) = phase de poussée. C'est la plus rentable sur le plan biomécanique et la plus « instinctive ». La phase de poussée correspond à une extension active de la hanche essentiellement grâce au moyen et au grand fessier, associée à une extension active du genou par le quadriceps et une extension du pied par le triceps sural. Durant la phase de poussée, le bassin doit être fixé par des stabilisateurs (abdominaux, carré des lombes).



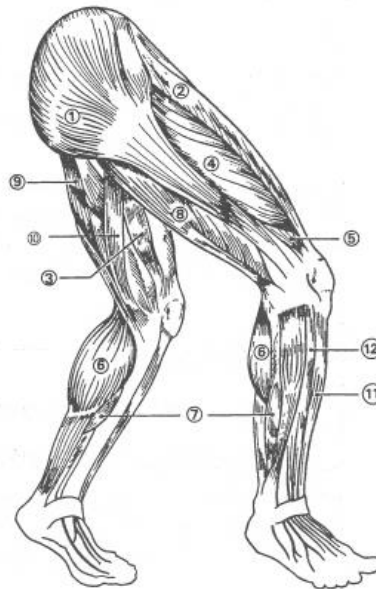
Phase 2 (de 145° à 220°) = phase de transition basse. Elle assure la transition entre la phase de poussée et la phase de traction. L'extension de hanche se poursuit, mais est maintenant associée à un début de flexion active du genou. L'action des ischio-jambiers et du triceps est prépondérante pour conserver l'énergie cinétique accumulée lors de la phase de descente de la pédale. La cheville est en flexion plantaire de quelques degrés. Cette phase doit s'enchaîner de la façon la plus souple et coordonnée avec la phase qui la précède et celle qui la suit.

Phase 3 (de 220° à 325°) = phase de traction. C'est la phase la moins instinctive du pédalage. La traction n'est possible que sur les vélos équipés de cale-pieds ou mieux, de pédales automatiques. Elle

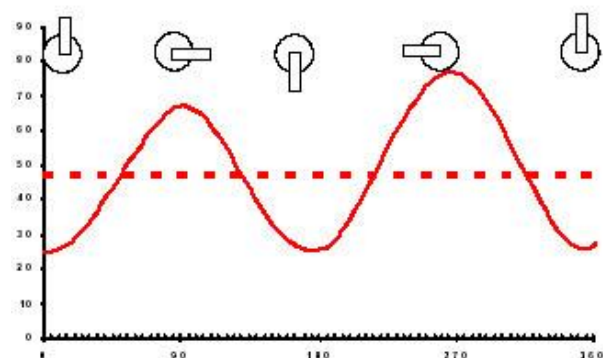
est réalisée par une flexion active de hanche et de genou. La flexion de hanche est due à l'action du psaos iliaque, du grand couturier et du droit antérieur. La flexion de genou est essentiellement due aux ischios-jambiers, qui se contractent de façon concentrique. C'est une phase de relâchement et de récupération pour le quadriceps et le triceps et tout le segment jambier (on ne retrouve quasiment aucune activité musculaire au-dessous du genou) pendant que le membre inférieur controlatéral est en phase de poussée. Comme pour la phase 1, il est essentiel que le bassin constitue un point fixe. Les muscles stabilisateurs du bassin (abdominaux, carrés des lombes, etc.) sont donc sollicités.

Phase 4 (325° à 20°) = phase de transition haute. Elle permet de remettre le membre inférieur en position de poussée. Pendant cette phase interviennent les releveurs du pied pour faire tourner la manivelle avec flexion dorsale du pied comme si la pointe du pied donnait un « coup de pied ».

	HANCHE	GENOU	CHEVILLE
EXTENSION	MOYEN FESSIER GRAND FESSIER ①	LES QUADRICEPS : • droit antérieur ② • vaste interne ③ • vaste externe ④ • crural ⑤	MUSCLES DES "MOLLET" TRICEPS SURAL • 2 jumeaux ⑥ • solaire ⑦
FLEXION	PSOAS ILIAQUE	LES ISCHIOS-JAMBIER • biceps crural ⑧ • demi-membraneux ⑨ • demi-tendineux ⑩ • couturier ⑪	• jambier antérieur ⑪ • extenseurs des ⑫ orteils



Graphe de transmission des forces au cours du cycle de pédalage



II. Coordination, efficacité et indice d'efficacité du pédalage

Lors du pédalage, si le membre en flexion repose passivement sur la pédale, alors il se crée un couple moteur résistant lors de la phase de remontée de la pédale contre lequel le membre qui pousse en phase de descente doit lutter. En d'autres termes, un travail supplémentaire est réalisé par le membre qui pousse sur la pédale. Les non spécialistes de l'activité exploitent surtout la 1^{ère} phase (phase d'appui) et laissent inconsciemment leur jambe arrière en appui sur la pédale qui remonte. Cela représente une perte d'énergie considérable vu le poids d'un membre inférieur (une dizaine de kilos).

Remarque : l'exploitation optimale des quatre phases est fortement dépendante du matériel employé, et notamment de pédales automatiques ou de cales pieds. Depuis la fin des années 80 on a constaté une accélération de l'évolution du matériel. Au chapitre des révolutions, on retrouve l'apparition des pédales automatiques qui ont permis de solidariser le pied à la pédale sans altérer la liberté du pied et de la cheville. Les avantages sont multiples :

- plus de sécurité (déchaussage rapide) ;
- plus de rendement (efforts de tractions sur la pédale facilités) ;
- plus de confort (plus besoin de serrage des sangles de cale-pieds).

La coordination des quatre phases va conditionner **l'efficacité** du geste de pédalage, c'est à dire son **rendement**. Cette efficacité se mesure par **l'indice d'efficacité du pédalage (IEP)** qui correspond au ratio entre la force efficace F_u , perpendiculaire à la manivelle, et la force résultante F_r . Comme le geste est répété des milliers de fois, les gains, même lorsqu'ils sont minimes font la différence entre des sujets possédant des qualités bioénergétiques et mentales comparables. Un bon rendement permet une diminution du coût énergétique (= de la consommation d' O_2), et une épargne musculaire qui peut être décisive dans les derniers km. Le geste de pédalage n'est donc pas un geste frustré, mais un geste complexe aux fines adaptations sensorimotrices, et qui doit faire l'objet d'une optimisation par l'apprentissage et l'entraînement : **il existe une efficacité technique du pédalage !**

Des études ont montré que l'habileté à diriger la force de manière optimale sur la pédale diminue de façon constante lorsque la fréquence de pédalage augmente. Cette diminution de l'efficacité avec le rythme de pédalage provient de difficultés de coordination gestuelle : le muscle ne parvient plus à se relâcher et à se contracter assez rapidement. Dès lors, la jambe qui remonte et son poids exercent une force frénatrice contre laquelle la jambe qui descend doit lutter. On comprend alors l'intérêt de l'entraînement pour améliorer le timing d'application de la force sur la pédale grâce à une meilleure technique de pédalage permettant d'optimiser la direction et la magnitude de la force efficace (F_u). L'efficacité du pédalage dépend donc de la qualité des coordinations inter et intramusculaires.

En revanche, d'autres études ont montré que l'IEP augmentait de manière significative avec la force développée sur la pédale. Réciproquement, il est plus difficile de diriger la force de manière optimale sur les pédales lorsque la puissance est faible.

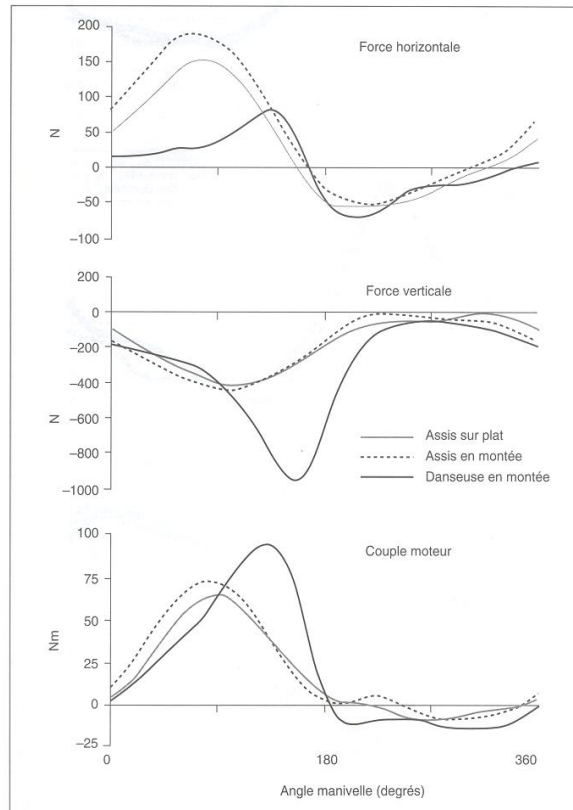
III. Pédalage assis et pédalage en danseuse

Les positions assises et en danseuse génèrent des patterns de pédalage différents : en danseuse le pic de force est significativement plus élevé, et il est décalé vers des angles de manivelle plus importants. Le pédalage en montée semble aussi générer des patterns différents que sur le plat.

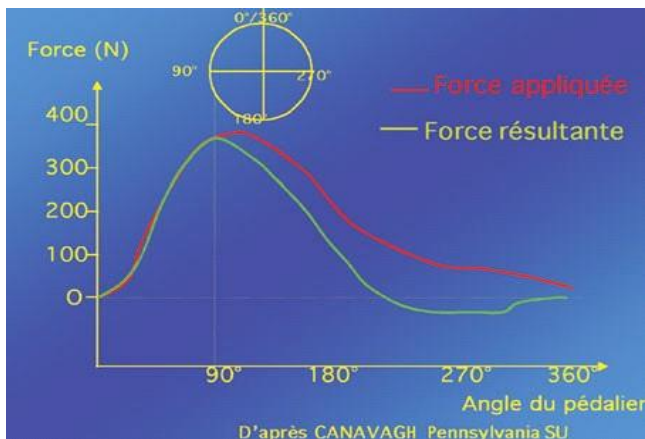
	Assis sur le plat	Assis en montée	Danseuse en montée
Pic de la force résultante (N)	438 ± 68	480 ± 73	965 ± 190
Angle de manivelle (°)	107 ± 13	101 ± 9	155 ± 9
Pic du couple (N.m)	68 ± 12	77 ± 11	101 ± 13
Angle de manivelle (°)	94 ± 7	86 ± 7	131 ± 9

Tableau 8.1

Données cinématiques et cinétiques sur le pattern de pédalage dans différentes positions (2)



Remarques : lorsque le cycliste applique une force sur la pédale, seule la composante tangentielle à la trajectoire de la pédale est rentable. Les autres composantes sont perdues. Canavagh a étudié l'application des forces sur les pédales lors d'un cycle de pédalage et mis en évidence une différence entre la force appliquée par le cycliste et la composante utile de cette force. Le diagramme suivant montre cette différence :

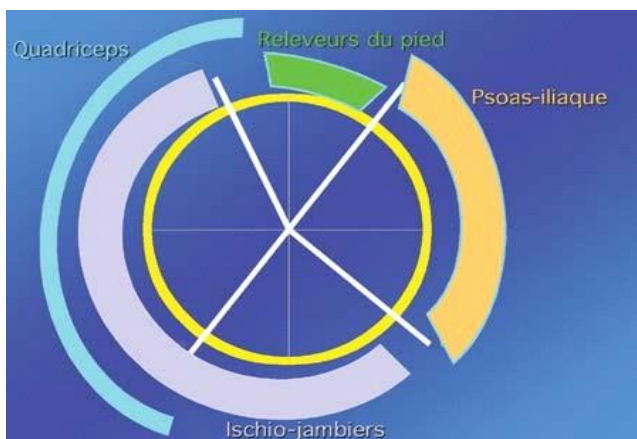


On note que la phase de poussée est très rentable sur le plan mécanique. C'est au niveau des phases de transition et des phases de tirage que le "gaspillage" est le plus important. L'auteur a aussi mis en évidence la différence de rendement entre

les différents cyclistes inclus dans son étude. Certains font de la phase de tirage une phase rentable, d'autres ne l'utilisent que très peu (figure ci-dessous). On peut penser que, pour les seconds, une meilleure utilisation de cette phase pourrait donner des gains de performance significatifs.



Le cycle de pédalage permet, pour chaque groupe musculaire, l'alternance de phases d'activité et de récupération. Plus le cycliste sera coordonné et relâché, plus il pourra bénéficier de ces phases de récupération.



IV. Procédures d'entraînement → optimisation du « coup de pédale »

Malgré sa simplicité apparente, le pédalage est un mouvement qui doit s'apprendre, ou plutôt s'optimiser si l'on souhaite exploiter au mieux ses ressources bioénergétiques. L'essentiel du travail technique porte sur l'orientation du pied sur la pédale pendant le cycle de pédalage afin d'optimiser le couple de force.

Selon F.Grappe (2005), « le coureur qui maîtrise bien l'enchaînement des phases de poussée et de traction de la pédale à partir d'une excellente technique de pédalage est certainement l'américain Lance Armstrong. La grande souplesse de sa cheville et la fluidité de sa gestuelle de pédalage lui permettent certainement d'optimiser son rendement mécanique ».

L'importance que nous avons accordée aux quatre phases dynamiques de pédalage suppose des procédés d'entraînement spécifiques :

- Pédalage à des cadences très élevées (hypervélocité) pendant une séquence courte, assis sur la selle et bassin fixé (descente avec développement court en ayant toujours une action propulsive du pied sur la pédale (= mettre toujours en tension la chaîne), en se rapprochant d'une cadence de 200 rpm).

- Pédalage à des cadences très basses (entre 40 et 50 rpm), assis sur la selle et bassin fixé (montées avec développement long, mains posés sur le cintre au lieu de le tenir, ou éventuellement mains derrière le dos).
- Méthode des contrastes consistant à enchaîner petit et grand braquet (par exemple montée avec 52X13 ou 14, et descente avec 42X19 ou 17).

Remarque : ces formes de travail (hypervélocité, force, méthode des contrastes) sont à réaliser à intensité modérée à I2-I3.

- **Technique de l'unijambiste** : séquences courtes et alternées de pédalage d'une seule jambe (500m d'abord, puis jusqu'à 1km d'une seule jambe), qui permettent d'améliorer la coordination de chaque membre (pratique sur home-trainer). Les séquences spécifiques n'excèdent pas 20 à 25 min. pour conserver une bonne qualité de concentration.
- Certains entraîneurs conseillent de travailler avec un pignon fixe (même si avec le pignon fixe, la pédale remonte toute seule, les muscles qui doivent servir justement à cette phase sont peu sollicités). Retour avec la mode du fixie (compétitions).
- Utilisation d'ergocycles qui permettent d'apporter un feedback en temps réel.
 - F.Grappe (2005) conseille d' « *entretenir les moments où le cycliste visualise sur l'écran avec des moments sans aucun feedback. Par la suite, l'entraîneur diminuera de plus en plus la durée des feedback et augmentera la durée pendant laquelle l'athlète doit grâce à ses propres sensations produire un pédalage fluide et symétrique. Ces exercices devront être réalisés à différents niveaux d'intensité et de fatigue* ».
 - Il y a longtemps les pistards d'Allemagne de l'Est ont même utilisé avec succès un petit dispositif qui émettait un signal sonore chaque fois que la jambe qui remontait était en appui au lieu d'exercer une traction.
 - A voir sur <http://www.bikefitting.com/> : mesure la puissance en 3D sur l'ensemble de la course de la pédale + visualise en temps réel la force de pédalage à gauche/droite.
 - <https://www.youtube.com/watch?v=9NbZfyuP70s>
- Sur home-trainer, pédaler devant un miroir de façon à associer les sensations kinesthésiques un retour extéroceptif (visuel) ; ou encore utiliser la vidéo avec un retour en direct sur écran (avec logiciel d'analyse de type Dartfish).
- Il est possible de travailler sa technique de pédalage dans d'autres spécialités que le cyclisme sur route (piste surtout, mais aussi VTT ou cyclo-cross), notamment en période hivernale.
- Le travail spécifique de musculation avec charges additionnelles exige que soit travaillés de façon équilibrée les muscles agonistes et antagonistes car le pédalage enchaîne des phases de flexion et d'extension des membres inférieurs (quadriceps et ischio-jambiers notamment).
- Le travail spécifique doit aussi porter sur le gainage car celui-ci permet une meilleure transmission des forces et limite les pertes d'énergie et les gestes parasites. Le gainage est le renforcement des muscles profonds et superficiels du tronc (abdominaux, dorsaux, muscle inspireur...), il contribue à la fixation du bassin.
 - remarque 1 : comme les patterns de pédalage sont différents assis et en danseuse, et différents sur le plat et en montée, il semble nécessaire d'alterner ces différentes façons de pédaler.
 - remarque 2 : les exercices spécifiques portant sur la technique de pédalage pourront se réaliser aussi en fin de sortie longue, de façon à travailler en situation de fatigue (qui a tendance à altérer la qualité du geste).

- remarque 3 : on demandera au cycliste de se concentrer sur son geste de pédalage, de façon à affiner ses sensations proprioceptives (travailler le « touché de pédale ») = chercher à « *pédaler rond* » ou à « tirer la pédale » (à l'instar des techniques de concentration de Jacques Anquetil, avant un contre-la-montre) ou « *caresser les pédales* » avec un talon qui reste haut (le pédalage de type « piston » talon toujours bas est moins efficace). Pourquoi ne pas envisager de travailler sur home-trainer des séquences courtes les yeux fermés pour mieux se concentrer sur les sensations.

V. Matériel et position

L'optimisation du geste de pédalage dépend aussi du matériel utilisé et de la position du coureur sur son vélo. Le réglage de l'engagement des chaussures sur les pédales est très important : l'axe de la pédale doit passer par l'articulation du gros orteil (l'axe de la pédale doit se situer sous l'axe de l'articulation du métatarse interne). Les chaussures à semelle carbone sont aujourd'hui utilisées, et permettent de limiter les pertes d'énergie dues aux déformations.

Du côté des innovations, les plateaux ovales seraient censés faciliter le passage des transitions hautes et basses. En 2012, Bradley Wiggins gagne Paris-Nice, le Tour de Romandie, le Dauphiné libéré et le Tour de France ainsi que l'épreuve contre-la-montre sur route des jeux olympiques de Londres avec des plateaux ovales O'symetric. Néanmoins, les études biomécaniques montrent que les différences entre plateaux ronds et ovales sont subtiles, et les avantages incertains. Une seule étude a montré une tendance à l'augmentation (quelques %) de la puissance maximale sur un sprint (F.Hintzy, A.Belly, F.Grappe, Effet d'un plateau non circulaire sur la relation force-vitesse obtenue lors d'un sprint sur un cycloergomètre, in *Science et motricité* n°40, juin 2000, p. 42-47). Les études comparatives sur le terrain sont difficiles car le coureur a besoin d'un temps d'adaptation pour s'habituer à ce matériel. Les études présentées par les fabricants présentent quant à elles des résultats avantageux pour les plateaux ovales, mais le protocole de test comme les résultats sont régulièrement remis en question.



Il existe aussi des manivelles indépendantes qui permettent un pédalage dissocié (PowerCranks) : chaque jambe fait effectuer un cycle complet à sa pédale sans action compensatrice de l'autre jambe. Ce matériel aurait pour avantage d'optimiser le geste de pédalage, notamment le passage des zones de transition hautes et basses, et serait utilisé uniquement à l'entraînement. Il est peu utilisé par les cyclistes de haut niveau.

