

## Symposium 9

### Cyclisme et performance

Coordinateur : C. Hausswirth  
INSEP, laboratoire de Biomécanique et Physiologie, Paris

En cyclisme, de nombreuses études descriptives mettent en évidence une relation curvilinéaire entre  $\dot{V}O_2$  et la cadence de pédalage pour une puissance d'exercice donnée, avec la possibilité de déterminer un optimum énergétique. Dans cette perspective, la valeur de l'optimum énergétique correspond à la cadence de pédalage la plus économique (i.e. valeur minimale de  $\dot{V}O_2$ ). Il est à noter que dans toute démarche de modélisation, la valeur de l'optimum énergétique calculée par le modèle utilisé est purement théorique et diffère de la valeur réelle. De plus, la valeur minimale de  $\dot{V}O_2$  n'est pas identifiable précisément pour les faibles puissances de sortie alors que la détermination de l'optimum énergétique est systématique pour les puissances de sortie les plus élevées. Ces observations peuvent être reliées à l'augmentation de  $\dot{V}O_2$  qui est accentuée aux cadences « extrêmes », permettant ainsi une détermination mathématique et précise de l'optimum avec l'élévation de la puissance de sortie.

L'analyse biomécanique du mouvement en cyclisme qui peut être abordée à partir des variations de la force appliquée sur les manivelles, montre que les valeurs maximales de cette variable sont obtenues lors de la phase propulsive dans un secteur angulaire compris entre 90 et 110°. Par conséquent, l'action musculaire produite dans ce secteur du cycle de pédalage est déterminante lors de la réalisation du mouvement en cyclisme. L'analyse de ce paramètre qui se situe au niveau du muscle et de l'articulation a fait l'objet de nombreuses modélisations. En cyclisme, les nombreuses études qui se sont intéressées véritablement à la modélisation du geste de pédalage suggèrent que les moments de force produits au niveau des trois centres de rotation des membres inférieurs (hanche, genou et cheville) constituent de bons indicateurs indirects de l'action musculaire. Par ailleurs, l'usage de l'EMG et de l'imagerie par résonance magnétique indique qu'il existe une importante variabilité interindividuelle dans le recrutement des différents muscles impliqués dans le pédalage des membres inférieurs dans une population de cyclistes de haut-niveau d'expertise. Ceci pourrait venir expliquer les nombreuses difficultés à interpréter les seuls signaux EMG dans le but de caractériser la genèse de la fatigue musculaire locale et/ou générale chez les cyclistes et les triathlètes. De plus, les notions de fréquence de pédalage et de fatigue peuvent être affinées par la notion de rythmes circadiens. Il est actuellement mis en évidence que les fréquences de pédalage employées à 18h sont significativement plus élevées par rapport à celles enregistrées à 6h du matin. Ces constatations soulignent également l'importance de choisir des phases homogènes d'horaires de tests dans la description fine des paramètres de cadence en cyclisme ; en effet, la fluctuation journalière semble également reliée à des modifications d'ordre cinématique et donc de la répartition et de l'amplitude des forces appliquées sur les pédales. Ajouté à ces paramètres, la notion de fatigue musculaire peut être étudiée à partir de la réduction de la capacité de production de force maximale au niveau des muscles extenseurs du genou. La diminution de production de force observée consécutivement à un exercice de pédalage prolongé est associée à des perturbations au niveau de la commande motrice mais aussi au niveau de la contractilité musculaire.

## Paramètres mécaniques et neuromusculaires de la performance en cyclisme

D. Rouffet<sup>1</sup>, K. Zameziati<sup>1</sup>, G. Mornieux<sup>1</sup>, A. Belli<sup>1</sup>

Un grand nombre de paramètres ont été présentés pour expliquer la performance en cyclisme. Au-delà des facteurs physiologiques ( $VO_2\max$ , % de  $VO_2\max$  au seuil d'accumulation d'acide lactique) et aérodynamiques (aire de la surface frontale,  $C_x$ ), de nombreuses études ont tenté de déterminer l'influence des paramètres mécaniques et neuromusculaires. Pour ce faire, les auteurs ont utilisé différents concepts : le coût énergétique, le rendement musculaire, l'efficacité de pédalage ainsi que le recrutement intermusculaire.

L'utilisation du coût énergétique du déplacement ( $Cr$  en  $J.kg^{-1}.m^{-1}$ ) a ainsi permis d'expliquer pourquoi les cyclistes professionnels utilisent des fréquences de pédalage de l'ordre de 90rpm (Lucia et coll. 2001) au cours des longues étapes de plat des grands tours (Italie, France et Espagne). Comme l'ont démontré Belli et Hintzy (2002), il s'avère que le choix de ces fréquences de pédalage permet aux coureurs de minimiser le coût énergétique de leur déplacement et donc d'améliorer leur performance. Les différences de fréquences optimales observées entre des sujets cyclistes et des non spécialistes relèvent de la poursuite d'objectifs différents. Les non spécialistes adoptent des fréquences de pédalage plus faibles (entre 60 et 80rpm) afin de réduire leur consommation d'oxygène ce qui ne leur permet en aucun cas de maximiser leur performance (Belli et Hintzy, 2002).

Le rendement est aussi un concept qui a été largement utilisé dans le domaine du cyclisme pour tenter d'expliquer la performance et les différences inter-individuelles (Di Prampero, 2000). Avant de développer les facteurs qui peuvent influencer et améliorer le rendement ( $\eta$ ), il est nécessaire de présenter les différents types de rendement utilisés dans la littérature. Le  $\eta$  Musculaire (Stainsby *et al.*, 1980) est égal au rapport entre le travail mécanique produit et l'énergie métabolique consommée ( $VO_2$ ). Émettant l'hypothèse qu'un sujet peut fournir plus de travail mécanique que le cyclo-ergomètre ne peut en mesurer, Gaesser et Brooks (1975) ont proposé à partir du  $\eta$  Musculaire d'amputer à la consommation totale d'oxygène différentes lignes de base afin de quantifier uniquement le travail musculaire nécessaire à la propulsion. C'est ainsi qu'ils ont défini le  $\eta$  Net ( $VO_2 - VO_2$  de repos) et le  $\eta$  Travail ( $VO_2 - VO_2$  du travail interne). Par ailleurs les auteurs ont présenté un  $\eta$  Delta permettant de décrire l'évolution du  $\eta$  entre deux limites choisies. Les notions de  $\eta$  Muscle et  $\eta$  Musculaire ont longtemps été confondues, les valeurs numériques de  $\eta$  Muscle et  $\eta$  Musculaire étant relativement proches :  $\eta$  Muscle  $\sim 29\%$  (Whipp et Wasserman, 1969) et  $\eta$  Musculaire  $\sim 30\%$ . Toutefois, comme cela a été démontré par Cavanagh et Kram (1985), il est important de ne pas confondre ces 2 rendements, ceux-ci n'ayant pas la même base physiologique (Stainsby *et al.*, 1980). Le  $\eta$  Musculaire est généralement retenu pour définir l'économie de pédalage d'un cycliste en condition sous-maximale. De nombreuses études ont montré que lors d'exercices sous-maximaux réalisés à puissance constante (intensité inférieure à 85% de  $VO_2\max$ ) le  $\eta$  Musculaire est maximal pour des fréquences de pédalage comprises entre 30 rpm et 60-70 rpm (Gaesser et Brooks, 1975 ; Marsh et Martin, 1993) sachant que la fréquence de pédalage optimale augmente avec le niveau de puissance à produire. Concernant l'influence du niveau d'expertise, Marsh et Martin (1995) n'ont pas révélé de différence significative de  $\eta$  entre cyclistes et non cyclistes pour des fréquences de pédalage de 40-100 rpm. Cependant pour des puissances comparables les sujets spécialistes maximisent la valeur du  $\eta$  Musculaire à des fréquences de pédalage supérieures à celles observées chez des sujets non-spécialistes (Böning et coll., 1984).

La prise en compte de l'efficacité de pédalage dans l'analyse de la performance relève de l'hypothèse selon laquelle le  $\eta$  Musculaire pourrait dépendre de la perte d'énergie entre le pied du cycliste et la pédale. Lafortune et Cavanagh (1983) se sont intéressés à cette question sans obtenir les résultats attendus, peut-être par manque de précision dans la mesure des forces appliquées sur les pédales et/ou à cause de l'utilisation d'un système modifiant les caractéristiques mécaniques du mouvement. Récemment, l'utilisation d'un nouveau système pour déterminer l'efficacité de pédalage a permis de mettre en évidence une relation significative entre le  $\eta$  Musculaire et l'efficacité de pédalage en condition sous-maximale (Zameziati et coll., 2002 ; Mornieux et coll. 2002). La revue de la littérature révèle que l'efficacité de pédalage est influencée par différents paramètres : le niveau de puissance (Patterson et Moreno, 1990), la fréquence de pédalage (Patterson et Moreno, 1990), la phase de la révolution de la pédale (Davis et Hull, 1981 ; Ericson et Nisell, 1988 ; Patterson et Moreno, 1990), l'interface pied-pédale (Ericson et Nisell, 1988) mais aussi le pattern de pédalage (Davis et Hull, 1981). Malgré

l'influence rapportée du pattern de recrutement musculaire, Sanderson (1991) n'a observé aucune influence d'efficacité de pédalage entre des cyclistes professionnels et des non-spécialistes.

L'analyse du recrutement musculaire au cours du pédalage a été largement utilisée pour tenter d'expliquer le choix des fréquences de pédalage. MacIntosh et coll. (2000) ont d'ailleurs démontré que le niveau d'activation des muscles du membre inférieur est minimisé à une fréquence de pédalage unique, d'autant plus importante que le niveau de puissance à fournir est élevé. Toutefois, l'hypothèse selon laquelle une minimisation de l'activité EMG des muscles du membre inférieur pouvait expliquer une réduction de la dépense énergétique ou le choix d'une cadence préférée n'a pu être vérifiée (Marsh et Martin, 1995). La comparaison de sujets non spécialistes et de cyclistes professionnels a montré une influence du niveau d'expertise sur le recrutement des muscles extenseurs et fléchisseurs du genou (Takaishi et coll., 1998). Les résultats de Takaishi et coll. (1998) semblent démontrer que les cyclistes professionnels réduisent la sollicitation des muscles producteurs de puissance (vastus lateralis et vastus medialis) en recrutant davantage le muscle biceps femoris (bi-articulaire). Ces données s'avèrent particulièrement intéressantes car elles confirment l'hypothèse de Van Ingen Schenau (1989) selon laquelle l'adaptation du recrutement des muscles bi-articulaires aux exigences du mouvement nécessite un long processus d'apprentissage. De plus si l'on se réfère aux résultats obtenus par Davis et Hull (1981), la modification du pattern de pédalage pourrait permettre une augmentation de l'efficacité de pédalage (de 29% à 38%). D'autres différences en terme de recrutement musculaire ont été rapportées par Marsh et Martin (1995) qui ont mesuré des niveaux moyens d'activation des muscles du triceps sural 30% plus faibles chez des cyclistes par rapport à des non-spécialistes. Malgré un pattern de recrutement intermusculaire différent, il est particulièrement important de noter que l'utilisation de cale-pieds pourrait empêcher les cyclistes d'augmenter leur efficacité de pédalage lors de la phase de montée de la pédale (Patterson et Moreno, 1990). En référence aux phases d'activation des muscles du membre inférieur, on peut se demander si les modifications de recrutement ne résultent pas en une amélioration de l'efficacité de pédalage au niveau du point mort bas (biceps femoris + gastrocnemius) voire du point mort haut (rectus femoris).

Cette brève revue de la littérature permet de constater que les concepts de coût énergétique, d'efficacité de pédalage, de recrutement intermusculaire, et de  $\eta$  Musculaire constituent autant d'outils d'analyse de la performance en cyclisme. Malgré l'existence de données contradictoires, l'hypothèse selon laquelle le pattern moteur de pédalage pourrait déterminer l'efficacité de pédalage et le  $\eta$  Musculaire semble recevable. C'est pourquoi il serait intéressant d'étudier de façon simultanée l'ensemble de ces paramètres pour tenter d'expliquer les différences inter-individuelles. Ceci paraît d'autant plus réalisable que l'on dispose d'un système de mesure des forces appliquées sur la pédale précis et ne modifiant pas les caractéristiques du mouvement de pédalage. Enfin pour éviter les écueils rencontrés par certaines études, il serait nécessaire d'analyser ces paramètres dans des conditions d'exercice proches du terrain, c'est-à-dire des niveaux de puissance suffisants (au-delà de 450W), des fréquences de pédalages optimales (de 90 à 110rpm) ainsi que l'utilisation d'ergocycles ayant des caractéristiques techniques comparables au matériel des cyclistes professionnels (pédales automatiques notamment).

### Références

- Belli, A., & Hintzy, F. (2002). Influence of pedalling rate on the energy cost of cycling in humans. *European Journal of Applied Physiology*, 88(1-2), 158-62.
- Böning, D., Gönen, Y., & Maassen, N. (1998). Relationship between work load, pedal frequency, and physical fitness. *International Journal of Sports Medicine*, 5(2), 92-7.
- Cavanagh, P.R., & Kram, R. (1985). The efficiency of human movement--a statement of the problem. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 17(3), 304-8.
- Davis, R.R., & Hull, M.L. (1981). Measurement of pedal loading in bicycling: II. Analysis and results. *Journal of Biomechanics*, 14(12), 857-72.
- di Prampero, P.E. (2000). Cycling on Earth, in space, on the Moon. *European Journal of Applied Physiology*, 82(5-6), 345-60.
- Ericson, M.O., & Nisell, R. (1988). Efficiency of pedal forces during ergometer cycling. *International Journal of Sports Medicine*, 9(2), 118-22.
- Gaesser, G. A., & Brooks, G. (1975). Muscular efficiency during steady-rate exercise: effects of speed and work rate. *Journal of Applied Physiology*, 38(6), 1132-1139.
- Lafortune, M.A., & Cavanagh, P.R. (1983). Effectiveness and efficiency during bicycle riding. *Biomechanics VIII-B* (pp. 928-936). Champaign, IL: Human Kinetics.

- Lucia, A., Hoyos, J., & Chicharro, J.L. (2001). Preferred pedalling cadence in professional cycling. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 33, 1361-1366.
- MacIntosh, B.R., Neptune, R.R., & Horton, J.F. (2000). Cadence, power, and muscle activation in cycle ergometry. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 32(7), 1281-1287.
- Marsh, A.P., & Martin, P.E. (1993). The association between cycling experience and preferred and most economical cadences. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 25(11), 1269-74.
- Marsh, A.P., & Martin, P.E. (1995). The relationship between cadence and lower extremity EMG in cyclists and noncyclists. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 27(2), 217-225.
- Mornieux, G., Zameziati, K., Mutter, E., & Belli, A. (2002). Influence of effectiveness on the interindividual variations of muscular efficiency in cycling. *7th Annual Congress of the European College of Sport Science in Athens* : O712.
- Patterson, R.P., & Moreno, M.I. (1990). Bicycle pedalling forces as a function of pedalling rate and power output. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 22(4), 512-6.
- Stainbsy, W.N., Gladden, L.B., Barclay, J.K., & Wilson, B.A. (1980). Exercise efficiency: validity of base-line subtractions. *Journal of Applied Physiology*, 48(3), 518-22.
- Takaishi, T., Yamamoto, T., Ono, T., Ito, T., & Moritani, T. (1998). Neuromuscular, metabolic, and kinetic adaptations for skilled pedalling performance in cyclist. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 30(3), 442-449.
- Van Ingen Schenau, G.J. (1989). From rotation to translation: constraints on multi-joint movements and the unique action of bi-articular muscles. *Human Movement Science*, 8, 301-337.
- Whipp, B.J., & Wasserman, K. (1969). Efficiency of muscular work. *Journal of Applied Physiology*, 26(5), 644-8.
- Zameziati, K., Mornieux, G., Hintzy, F., Mutter, E., & Belli, A. (2002). Effect of cycling effectiveness on muscular efficiency changes induced with power. *7th Annual Congress of the European College of Sport Science in Athens* : O713.

## Détermination par l'IRM et l'EMG des muscles impliqués dans le pédalage chez des cyclistes professionnels

François Hug<sup>1</sup>, David Bendahan<sup>2</sup>, Yann. Le Fur<sup>2</sup>, Patrick Cozzone<sup>2</sup> & Laurent Grélot<sup>1</sup>

<sup>1</sup>UPRES EA 3285. "Déterminants Physiologiques de l'Activité Physique", Faculté des Sciences du Sport, IFR 107 "Marey", Marseille

<sup>2</sup>UMR CNRS 6612. "Centre de Résonance Magnétique Biologique et Médicale", Faculté de Médecine, Marseille

Les études portant sur l'analyse des muscles impliqués dans une activité de pédalage ont jusqu'à présent été conduites uniquement sur des sujets sédentaires ou cyclistes amateurs (Eisner *et al.*, 1999 ; Ericson *et al.*, 1986). Elles ne montrent aucune différence interindividuelle dans l'utilisation des différents muscles et se bornent souvent à l'utilisation d'une seule technique d'analyse : l'électromyographie de surface (EMG). L'EMG est utilisée depuis de nombreuses années dans l'étude de l'activité musculaire. Par ailleurs, les techniques d'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM) permettent également une exploration fonctionnelle non invasive des muscles. Ainsi, l'analyse des modifications (avant *versus* après exercice) de contraste (de type T<sub>2</sub>) permet de caractériser les muscles impliqués dans l'effort. L'amplitude de ces changements est corrélée à l'intensité de l'exercice (Fisher *et al.*, 1990).

Le but de ce travail préliminaire est de coupler l'IRM et l'EMG pour étudier le patron d'utilisation des différents muscles des membres inférieurs lors d'épreuves de pédalage réalisées jusqu'à épuisement chez une population de cyclistes professionnels. Notre approche expérimentale permet de déterminer si les cyclistes experts présentent ou non un patron semblable d'utilisation de ces différents muscles.

Huit cyclistes professionnels ont participé à cette étude. Leurs caractéristiques morphologiques et physiologiques sont présentées sous forme de moyennes ± SEM dans le tableau ci-dessous.

	Age (années)	Taille (m)	Masse (kg)	VO <sub>2</sub> max (ml.min <sup>-1</sup> .kg <sup>-1</sup> )	PMT (Watts)
<b>Moyenne (n=8)</b>	24,5 ± 2,5	1,82 ± 0,03	72,4 ± 3,6	73,6 ± 4,22	486 ± 32

Pour chaque sujet, la phase expérimentale s'est déroulée sur une journée. Les cyclistes ont réalisé le matin une épreuve triangulaire sur cycloergomètre (Excalibur, Lode<sup>®</sup>, France). Après 3 minutes d'échauffement à 100 Watts, la charge a été augmentée de 26 Watts toutes les minutes jusqu'à épuisement et arrêt volontaire du sujet. Durant cette épreuve ont été enregistrés l'EMG (Mega, Finlande) de huit muscles du membre inférieur droit : *Vastus lateralis* (VL), *Rectus femoris* (RF), *Vastus medialis* (VM), *Semitendinosus* (ST), *Biceps femoris* (BF), *Gastrocnemius lateralis* (GL), *Gastrocnemius medialis* (GM) et *Tibialis anterior* (TA). Après 3 h de récupération incluant un repas, les sujets ont réalisé une épreuve rectangulaire sur le même cycloergomètre. Après 10 minutes d'échauffement à 100 Watts, la charge a été augmentée jusqu'à la puissance maximale tolérée (PMT) du sujet, mesurée lors de l'épreuve triangulaire du matin. Le sujet devait maintenir cette charge jusqu'à épuisement (t<sub>lim</sub>PMT). Les enregistrements IRM ont été réalisés sur la cuisse droite avant et immédiatement (latence d'acquisition = 38 s) après l'exercice.

Le signal EMG a été traité par le logiciel MegaWin (Mega<sup>®</sup>, Finlande) pour obtenir le *Root Mean Square* (RMS) révélant ainsi la puissance moyenne du signal myoélectrique pour chacun des muscles étudiés. Nos résultats montrent que les variations du RMS de chacun des muscles sont très différentes entre les sujets.

L'analyse des IRM pondérées en T<sub>2</sub> montre également une importante variation interindividuelle de l'utilisation des différents muscles de la cuisse (VL, RF, VM, ST, BF) lors de l'épreuve d'effort rectangulaire.

Nous rapportons donc pour la première fois dans cette étude qu'il existe une importante variabilité interindividuelle dans le recrutement des différents muscles impliqués dans le pédalage chez une population de cyclistes professionnels (experts) par ailleurs homogène en terme de puissance maximum aérobie. Bien que s'agissant d'exercices de nature différente (épreuve triangulaire *vs* rectangulaire), nous notons que les modifications métaboliques reflétées par l'augmentation de T<sub>2</sub> semblent reliées aux modifications électromyographiques reflétées par l'augmentation du RMS.

*Cette étude a été financée par Amaury Sport Organisation (ASO) - Société du Tour de France.*

**Références**

- Eisner, D.V., Bode, S.D., Nyland, J., & Carbon, D.N.M.. (1999). Electromyographic timing analysis of forward and backward cycling. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 31, 449-455.
- Ericson, M. (1986). On the biomechanics of cycling : a study of joint and muscle load during exercise on the bicycle ergometer. *Scandinavia Journal of Rehabilitation and Medicine*, 16, 1-43.
- Fischer, M.J., Meyer, R.A., Adams, G.R., Foley, J.M., & Potchen, E.J. (1990). Direct relationship between proton T<sub>2</sub> and exercise intensity in skeletal muscle MR images. *Investigation Radiology*, 25, 480-485.
- Reid, R.W., Foley, J.M., Jayaraman, R.C., Prior, B.M., & Meyer, R.A. (2001). Effects of aerobic capacity on the T<sub>2</sub> increase in exercised skeletal muscle. *Journal of Applied Physiology*, 90, 897-902.

## **Influence des facteurs neuromusculaires sur la performance au cours d'épreuves cyclistes prolongées**

R. Lepers & G. Millet  
UFR STAPS Dijon, Faculté des Sciences du Sport, Dijon

La performance au cours d'un exercice prolongé dépend du maintien des différentes fonctions physiologiques de l'organisme : systémiques, neuromusculaires, et sensorielles. La capacité à soutenir une puissance ou une vitesse au niveau le plus élevé durant la totalité de l'exercice va déterminer la performance au cours d'une épreuve d'endurance.

Le maintien des fonctions neuromusculaires est essentiel pour retarder ou éviter la chute de la performance. Les altérations du métabolisme au niveau du muscle squelettique induites par la déplétion glycolytique et les perturbations ioniques ont été identifiées comme des causes possibles de fatigue au cours d'efforts prolongés. Des travaux récents ont aussi mis en évidence l'existence d'une fatigue centrale au cours d'exercices prolongés ; c'est à dire une réduction de la commande motrice efférente vers les muscles actifs, en amont de la jonction neuromusculaire.

Le but de cet exposé est d'analyser l'influence des facteurs neuromusculaires sur la performance au cours d'épreuves cyclistes prolongées.

### **Fatigue musculaire**

Au cours d'efforts de longue durée en cyclisme, la fatigue musculaire peut être évaluée en analysant par exemple la réduction de la capacité de production de force maximale au niveau des muscles extenseurs du genou. Les diminutions de forces maximale isométrique (MVC) et concentrique relevées à la fin d'exercices cyclistes prolongés sont comprises entre 9 et 18 % suivant de l'intensité et la durée d'exercice (30 min à 5h). La diminution de la capacité de production de force observée consécutivement à un effort prolongé est associée à des perturbations au niveau de la commande motrice mais aussi à des modifications au niveau de la contractilité musculaire.

### **Altérations nerveuses**

La diminution de MVC post-exercice est associée dans tous les cas à une réduction de l'activité électrique (EMG) enregistrée au niveau des muscles extenseurs du genou témoin d'une réduction de l'influx nerveux arrivant au niveau musculaire. Cette altération de la commande nerveuse peut cependant avoir des origines centrales et/ou périphériques. Les techniques de stimulation (cutanée ou nerveuse) ont permis de préciser l'importance des facteurs centraux et périphériques dans la diminution de l'activité électrique musculaire. Ainsi, il a été montré, grâce à la technique de stimulation du nerf fémoral, que les caractéristiques du potentiel d'action musculaire (ou onde M) étaient modifiées au cours d'un exercice cycliste de 5h (55 % de PMA) réalisé en laboratoire, indiquant la présence d'une fatigue nerveuse périphérique ; ces altérations intervenant essentiellement en fin d'exercice. Au contraire, le potentiel d'action musculaire résultant n'était pas altéré après un exercice plus court mais plus intense (30 min à 80 % de PMA) (Lepers et coll. 2001).

Les techniques de stimulation surimposée à la contraction maximale volontaire ont permis quant à elles d'identifier un possible déficit d'activation centrale, caractérisé par une augmentation de la force induite par stimulation électrique. Un déficit d'activation centrale a été mis en évidence après des exercices cyclistes prolongés d'intensité et durée variables réalisés en laboratoire. Ces altérations ont été observées surtout en fin d'exercice quand celui avoisine les 5h. Il faut noter que la réduction d'activation centrale n'a été observée après une course cycliste avoisinant les 5 h réalisée en condition écologique. Des études comparant des situations d'exercices continus (laboratoire) versus intermittents (course sur route) sont nécessaires pour préciser l'importance de la composante centrale de la fatigue au cours d'exercices cyclistes prolongés.

### **La contractilité musculaire**

Les modifications des propriétés contractiles du muscle quadriceps peuvent être appréhendées par l'analyse de la réponse musculaire associée à une stimulation unique ou un train de stimulation du nerf fémoral. Ainsi, il a été montré que l'exercice prolongé de cyclisme altèrerait significativement les paramètres de la secousse musculaire : diminution du pic de force et de la vitesse maximale de contraction (Lepers et coll. 2001, 2002). Ces modifications du processus de couplage excitation-

contraction peuvent cependant avoir plusieurs explications telles que des changements de concentration de certains métabolites ( $H^+$ , Pi), une diminution de la quantité de  $Ca^{2+}$  libéré par le réticulum sarcoplasmique ou encore une réduction de la sensibilité au  $Ca^{2+}$ . Il a été montré que la contractilité musculaire estimée à partir de la force tétanique induite par un train de stimulations à 100 Hz était altérée de 12% après un exercice de 5h réalisé sur ergocycle (Rochette et al 2002). Au contraire, les forces tétaniques à 20 et 80 Hz (mesurées 15 à 30 minutes post-exercice) n'étaient pas significativement altérées après une épreuve cyclo-sportive de durée similaire (Millet et al 2003).

### Conclusion

La détérioration de la capacité de production de force du muscle quadriceps au cours d'un exercice prolongé de cyclisme résulte d'une réduction de l'influx nerveux en direction de ce muscle mais aussi de mécanismes périphériques tels que l'altération de l'excitabilité membranaire et du couplage excitation-contraction. Les différences observées entre les situations de laboratoire et de terrain peuvent s'expliquer par la nature différente des exercices : les tests en laboratoire sont la plupart du temps réalisés à intensité constante alors que les épreuves cyclistes sur route ont un caractère plus discontinu. Des études de laboratoire reproduisant les situations de course sur route seront nécessaires à l'avenir pour préciser l'importance des facteurs neuromusculaires dans la performance cycliste.

### Références

- Lepers, R., Millet, G.Y., Maffiuletti, J. (2001). Effect of cycling cadence on contractile and neural properties of knee extensors. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 33, 1882-1888.
- Lepers, R., Maffiuletti, N., Rochette, L., Brugniaux, J., & Millet, G.Y. (2002). Neuromuscular fatigue during a long duration cycling exercise. *Journal of Applied Physiology*, 92, 1487-1493.
- Millet, G.Y., Millet, G.P., Lattier, G., Maffiuletti, N.A., & Candau, R. (2003). Alteration of neuromuscular function after a prolonged road cycling race. *International Journal of Sports Medicine*, 24, 190-194.
- Rochette, L., Lepers, R., Brugniaux, J., Maffiuletti, N., & Millet, G. (2002). Modifications neuromusculaires et cardio-respiratoires induites par un exercice cycliste de longue durée. *Science & Motricité*, 45, 85-100.

## Fluctuation journalière de l'activité de pédalage

S. Moussay<sup>1</sup>, N. Bessot<sup>1</sup>, B. Sesboué<sup>2</sup>, A. Gauthier<sup>1</sup>, J. Larue<sup>1</sup> & D. Davenne<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CRAPS EA 2131, UFR STAPS de Caen

<sup>2</sup>Institut Régional de Médecine du Sport, CHU de Caen

Si de nombreuses études des rythmes circadiens ont été réalisées au cours de tâches de pédalage mettant en jeu les membres inférieurs, à notre connaissance, aucune d'entre elles ne s'est attachée à décrire les influences circadiennes sur les paramètres biomécaniques du mouvement. Pourtant, les fluctuations journalières, de l'adaptation à l'effort aérobic (Giacomoni *et al.*, 1999) et anaérobic (Reilly et Down, 1992), de la force musculaire (Gauthier *et al.*, 1996), de la vitesse de conduction nerveuse (Ferrario *et al.*, 1980), de la perception de l'effort (Faria et Drummond, 1982) ou encore de la température en condition d'exercice (Callard *et al.*, 2000), ont déjà été mises en évidence. Ces fluctuations circadiennes ne peuvent-elles pas laisser supposer que les conditions de réalisation d'une tâche de pédalage puissent elles-mêmes fluctuer au cours de la journée ?

Au sein de cette problématique, nos hypothèses de travail sont les suivantes :

- En raison des fluctuations circadiennes des variables cardio-respiratoires et neuromusculaires, la fréquence de pédalage spontanée utilisée par des cyclistes experts au cours de différents exercices aérobies, peut présenter des fluctuations diurnes.

- Pour une fréquence de pédalage donnée, les patterns de réalisation du mouvement de pédalage pourraient être affectés par l'heure de la journée en raison des fluctuations circadiennes affectant le système musculo-squelettique.

**Méthode.** 1) Lors de la première étude, chaque sujet a été soumis à 2 situations expérimentales. Un exercice maximal aérobic à charge progressivement croissante et un exercice sous-maximal aérobic sollicitant 70 % de la PMA, ont été organisés sur bicyclette ergométrique à 06:00 h et 18:00 h. Au cours de chaque test la fréquence de pédalage était laissée au choix du sujet. Afin d'évaluer les effets de l'heure de la journée sur les paramètres de la performance, des indices physiologiques de l'adaptation à l'effort (FC,  $\dot{V}_e$ , QR,  $\dot{V}O_2$  et lactatémie) ont été enregistrés. Par ailleurs, un enregistrement continu de la fréquence de pédalage et de la cinématique du mouvement ont permis d'analyser les effets de l'influence circadienne sur les paramètres cinématiques du mouvement.

2) Au cours de la deuxième étude il a été demandé aux sujets d'effectuer un exercice sous-maximal aérobic à 50 % de leur PMA. L'exercice a été effectué à 06:00, 10:00, 14:00, 18:00 et 22:00 h. La fréquence cardiaque et la fréquence de pédalage ont été les seuls indices physiologiques et biomécaniques enregistrés au cours de l'effort.

3) Le troisième protocole mis en place vise à étudier l'influence de la rythmicité circadienne sur l'organisation du cycle de pédalage au cours d'un effort d'intensité sous-maximale constante où la fréquence de pédalage est successivement laissée au choix du sujet puis imposée. Il a été demandé aux sujets d'effectuer un exercice sous-maximal aérobic à 50 % de leur PMA. L'exercice a été effectué à 06:00 h et 18:00 h. La fréquence cardiaque et la fréquence de pédalage ont été enregistrés. Par ailleurs, un enregistrement cinématique a été effectué à la fin de chacune des 3 phases de l'exercice.

**Résultats.** Etude 1. Concernant les paramètres physiologiques, les valeurs maximales atteintes au cours de l'exercice maximal aérobic ne montrent aucune variation diurne significative. Au cours de cette même épreuve, les valeurs transitoires de la  $\dot{V}_e$  sont significativement supérieures à 18:00 h par rapport à 06:00 h. Au cours de l'exercice sous-maximal, la seule la  $\dot{V}_e$  dont les valeurs enregistrées sont supérieures à 18:00 h par rapport à 06:00 h présente des fluctuations journalières significatives. L'analyse des paramètres biomécaniques montre une augmentation de la fréquence de pédalage spontanée au cours de l'exercice à charge croissante. Cette fréquence de pédalage spontanément adoptée présente une fluctuation diurne, avec des valeurs supérieures à 18:00 h par rapport à 06:00 h pour des niveaux de puissance faibles. Cette différence matin / soir disparaît pour des puissances élevées. Ce phénomène contraste avec le rythme circadien de la force musculaire (Gauthier *et al.* 1997) dont la batyphase est relevée à 06:00 h. Les valeurs basses de la force musculaire classiquement observées à 06:00 h auraient dû impliquer une augmentation de la fréquence de pédalage à cette même heure. L'analyse cinématique permet d'observer une fluctuation diurne de l'angle de mobilisation de la cheville pour un point donné du cycle de pédalage et pour un même niveau de puissance développé.

L'amplitude de mobilisation de la cheville au cours d'un cycle de pédalage n'est pas altérée par l'heure de test. En revanche, l'angle moyen de flexion plantaire de la cheville enregistré au cours d'un cycle complet de pédalage, est supérieur à 18:00 h par rapport à 06:00 h. Au cours de l'exercice sous-maximal sollicitant 70 % de la PMA les fluctuations diurnes d'ordre biomécanique évidentes lors de l'épreuve maximale aérobie ne sont plus observables. *Etude 2.* En ce qui concerne les valeurs de la FC, un rythme peut être observé en condition de repos, son acrophase est estimée à 15:19 ± 1:52 h. La fluctuation circadienne de la FC observée en condition de repos disparaît complètement en condition d'exercice sous-maximal aérobie. En condition d'exercice sous maximal aérobie, réalisé à 50% de PMA, les valeurs moyennes de la fréquence de pédalage spontanée varient de manière significative au cours de la journée avec des valeurs minimales à 06:00 h ( $92,4 \pm 2,9$  rév min<sup>-1</sup>) et maximales à 22:00 h ( $96,5 \pm 2,8$  rév min<sup>-1</sup>), l'amplitude de variation journalière est estimée à  $5,9 \pm 1,2$  rév min<sup>-1</sup>. La fluctuation journalière de la fréquence de pédalage n'est pas synchronisée avec le rythme circadien de la force musculaire (Gauthier et al., 1997), les cyclistes choisissent en effet une fréquence de pédalage spontanée réduite le matin par rapport au soir alors que la force musculaire atteint ses valeurs les plus basses. Les variations journalières de la fréquence cardiaque de repos et de la fréquence de pédalage sont corrélées avec les fluctuations de température. Cette seconde étude permet de confirmer la fluctuation diurne de la fréquence de pédalage en condition d'exercice sous-maximal, observée au préalable en condition d'exercice sous-maximal transitoire. *Etude 3.* Les fréquences de pédalage spontanées mesurées aux cours de cette troisième étude sont significativement supérieures à 18:00 h ( $87,8 \pm 2,2$  rév min<sup>-1</sup>) par rapport à 06:00 h ( $84,4 \pm 1,7$  rév min<sup>-1</sup>). Ainsi, cette étude permet de confirmer les fluctuations journalières de la fréquence de pédalage observées aux cours des 2 premières études. Concernant l'étude de la fréquence cardiaque, aucune fluctuation diurne ne peut être observée, en revanche, l'analyse des valeurs indique une augmentation de la fréquence cardiaque lorsque la fréquence de pédalage utilisée augmente. L'analyse cinématique permet de mettre en évidence une fluctuation (i) de la vitesse de déplacement de la pédale au cours du cycle de pédalage, elle se caractérise par des phases rapides et plus lentes dont la localisation au cours du cycle de pédalage reste stable quelle que soit l'heure du test ou la fréquence de pédalage étudiée ; (ii) une fluctuation journalière de l'amplitude de variation de la vitesse de la pédale au cours du cycle de pédalage. L'angle d'ouverture de la cheville formé par les axes reliant le condyle fémoral et le sésamoïde à la malléole est, pour une fréquence de pédalage donnée, modifié en fonction de l'heure de la journée. L'angle moyen d'ouverture de la cheville est plus important le soir que le matin. Cette étude permet de confirmer les fluctuations de la cinématique du pédalage observées au cours de la première étude, elle assure que les modifications alors observées n'étaient pas exclusivement liées aux variations de fréquence de pédalage. En effet, les variations de la cinématique du pédalage sont observées lorsque la fréquence de pédalage est maintenue constante entre 2 heures de test différentes. Le pédalage étant un mouvement en boucle fermée où le pied et la hanche sont maintenus en position fixe (sans degré de liberté), la modification de la cinématique du mouvement observée ici nous laisse penser que d'autres modifications journalières doivent pouvoir être observées, quant à la répartition et l'amplitude des forces appliquées à la pédale, mais aussi concernant les synergies musculaires et les coopérations musculaires entre muscles agonistes et antagonistes.

### Références

- Callard, D., Davenne, D., Gauthier, A., Lagarde, D., & Van Hoecke, J. (2000). Circadian rhythms in human muscular efficiency: continuous physical exercise versus continuous rest. A crossover study. *Chronobiology International*, 17(5), 693-704.
- Faria, I.E., & Drummond, B.J. (1982). Circadian changes in resting heart rate and body temperature, maximal oxygen consumption and perceived exertion. *Ergonomics*, 25(5), 381-386.
- Ferrario, V.F., Tredici, G., & Crespi, V. (1980). Circadian rhythm in human nerve conduction velocity. *Chronobiologia*, 7(2), 205-209.
- Gauthier, A., Davenne, D., Gentil, C., & Van Hoecke, J. (1997). Circadian rhythm in the torque developed by elbow flexors during isometric contraction. Effect of sampling schedules. *Chronobiology International*, 14(3), 287-294.
- Giacomini, M., Bernard, T., Gavarry, O., Altare, S., & Falgairette, G. (1999). Diurnal variations in ventilatory and cardiorespiratory responses to submaximal treadmill exercise in females. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 80(6), 591-597.
- Reilly, T., & Down, A. (1992). Investigation of circadian rhythms in anaerobic power and capacity of the legs. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 32, 343-347.

## Stratégies de cadence et enchaînement cyclisme-course à pied chez des triathlètes

F. Vercruyssen<sup>1</sup>, R. Suriano<sup>2</sup>, D. Bishop<sup>2</sup> & J. Brisswalter<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université de Toulon-Var

<sup>2</sup> Département des Sciences de l'Exercice et du Mouvement Humain, Université du Western Australia, Perth, Australie.

Dans le contexte des activités unimodales (e.g. cyclisme) ou multivariées (e.g. enchaînement cyclisme-course à pied) de longue durée, quelques études mettent en évidence une influence de la cadence de pédalage sur les réponses métaboliques et biomécaniques lors de l'exercice (Bernard et coll., 2003 ; Brisswalter et coll., 2000 ; Gottshall et coll., 2002 ; Lepers et coll., 2001, 2002 ; Vercruyssen et coll., 2002). Les modalités d'adaptation induites lors de l'épreuve cyclisme peuvent dépendre de la cadence de pédalage libre ou imposée se situant dans un intervalle compris entre 60 et 110 rpm, du niveau d'entraînement ou encore des contraintes spécifiques de l'activité (durée et intensité) (e.g. Brisswalter et coll., 2000 ; Lepers et coll., 2000 ; Lucia et coll., 2001 ; Vercruyssen et coll., 2001).

Dans le cadre de l'enchaînement cyclisme-course à pied (Càp), des résultats récents indiquent un effet différencié de la cadence sur les réponses adaptatives induites lors de la Càp subséquente chez des triathlètes. Dans cette perspective, Gottshall et Palmer (2002) ont indiqué récemment une amélioration de la performance en Càp sur une distance de 3200 m après l'adoption d'une cadence de 109 rpm, comparativement aux conditions où la cadence correspondait à 71 et 90 rpm. Ces auteurs suggèrent que cette amélioration de la performance en Càp pourrait être la résultante d'une combinaison optimale entre les patrons de locomotion générés lors des épreuves cyclisme et Càp. En effet, le choix d'une cadence de pédalage élevée (i.e. 109 rpm) immédiatement avant la transition serait responsable de l'élévation concomitante de la fréquence de foulée et de la vitesse de déplacement lors de la Càp subséquente. A l'inverse, les données de Bernard et coll. (2003) montrent aucun effet de la cadence sur la performance en Càp sur des distances de course similaires (i.e. 3000 m). Par ailleurs, sur une durée d'exercice de 30-min, Vercruyssen et coll. (2002) montrent que le choix d'une cadence correspondant à la plus économique (73 rpm) améliore l'adaptation métabolique des triathlètes lors de l'enchaînement cyclisme-Càp, comparativement à l'adoption préalable de cadences plus élevées (> 80 rpm). Par conséquent, le choix d'une cadence plus faible et proche de l'optimum métabolique, associé à une réduction de la charge métabolique, semble être bénéfique lors de la Càp et pourrait constituer une stratégie de course applicable avant la transition cyclisme-Càp. Dans le cadre de l'analyse de la relation entre cadence en cyclisme et performance en Càp, les données de la littérature parfois contradictoires rendent difficile la possibilité de prescrire une stratégie de course bénéfique liée au choix de la cadence gestuelle.

Dans la plupart des travaux cités précédemment, la cadence de pédalage reste constante sur toute la durée d'exercice en cyclisme et ne semble pas répliquer les conditions écologiques où les changements de cadence et de puissance de sortie sont accentués à l'approche de la transition cyclisme-Càp et pourraient être bénéfiques sur la performance totale (e.g. Bentley et coll., 2002 ; Bernard et coll., 2003). Dans son contexte de pratique, la variation de la cadence peut être liée au profil de la course (parcours tracé, dénivélé), au bénéfice ou non de la composante drafting (i.e. processus d'aspiration) ou encore aux différentes stratégies de course pouvant être mises en place à l'approche de la transition cyclisme-Càp. A cet effet, Bernard et coll. (2003) mettent en évidence plusieurs stratégies de course pouvant être adoptées par les triathlètes. Parmi celles-ci, une des stratégies consisterait à augmenter la vitesse de pédalage (par une augmentation de la cadence) avant la transition afin de conserver un bon positionnement par rapport à un groupe de triathlètes débutant la Càp enchaînée (c'est une situation qui concerne particulièrement les triathlètes élites). Une seconde stratégie de course concernerait les triathlètes ne pouvant pas bénéficier de la composante drafting et qui consisterait à augmenter la cadence tout en réduisant la puissance de sortie de façon à minimiser les effets « résiduels » ou délétères induits par la transition cyclisme-Càp. A notre connaissance, aucune étude ne s'est véritablement intéressée à l'influence des stratégies de cadence pouvant être mises en œuvre lors de l'épreuve cyclisme sur l'adaptation de l'athlète en Càp.

Situé dans cette problématique, nous avons étudié l'influence d'une stratégie de cadence (pour une même puissance de sortie), i.e. basses versus élevées, lors des dix dernières minutes précédant la transition, sur le temps limite et l'adaptation métabolique de la Càp enchaînée. 8 triathlètes ont réalisé 1 test de détermination de la consommation maximale d'oxygène ( $VO_{2max}$ ) et du seuil lactique (SL, Bis-

hop et coll., 2002) sur ergomètre (EG) et sur tapis roulant (TR) ( $VO_{2max} = 67,6 \pm 3,6$  et  $68,9 \pm 4,6$  mL. kg<sup>-1</sup>. min<sup>-1</sup>, respectivement sur EG et sur TR), et 3 sessions d'enchaînement cyclisme-Càp dans un ordre aléatoire. En situation enchaînée, chaque épreuve de cyclisme (90 % de LT) est effectuée, soit 1) à la cadence librement choisie (CL) pendant 30 minutes, soit 2) à CL au cours des 20 premières minutes et à CL-20% au cours des dix dernières minutes ou soit 3) à CL au cours des 20 premières minutes et à CL+20% au cours des dix dernières minutes de cyclisme. Ces épreuves de cyclisme, réalisées sur un vélo équipé du système SRM (crankset) et fixé sur un turbo-trainer, sont immédiatement suivies par la réalisation d'un temps limite en Càp (Tlim) à une vitesse de course correspondant à 85 % de la vitesse maximale aérobie ( $16,7 \pm 0,7$  km.h<sup>-1</sup>). Les principaux résultats indiquent que le choix d'une cadence faible (74 rpm) comparée à une cadence élevée (109 rpm) les dix dernières minutes de cyclisme est associé d'une part, à une réduction de la charge métabolique (i.e. diminution significative des valeurs de VO<sub>2</sub>, débit ventilatoire, lactatémie et fréquence cardiaque) et d'autre part, à une amélioration du temps limite lors de la Càp subséquente (+ 44 %). Contrairement aux résultats de Gottshall et Palmer (2002) qui mettent en évidence un effet bénéfique de l'adoption d'une cadence élevée (>100 rpm) avant la course à pied, les données de notre étude suggèrent qu'une stratégie de cadence basée sur la sélection d'une cadence faible (<80 rpm) pourrait être avantageuse avant la transition cyclisme-Càp. Situé dans les contraintes réelles de l'activité, cette stratégie de cadence pourrait réduire l'apparition du processus de fatigue classiquement rapportée au cours des derniers kilomètres de cyclisme et améliorer la performance lors de la Càp subséquente chez des triathlètes.

### Références

- Bernard, T., Vercruyssen, F., Grego, F., Hausswirth, C., Lepers, R., Vallier, J.M., & Brisswalter, J. (2003). Effect of cycling cadence on subsequent 3-km running performance in well trained triathletes. *British Journal of Sports Medicine*, 34, 154-159.
- Bishop, D., Bonetti, D., & Dawson, B. (2002). The influence of pacing strategy on VO<sub>2</sub> and supra-maximal kayak performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 34, 1041-1047.
- Brisswalter, J., Hausswirth, C., Smith, D., Vercruyssen, F., & Vallier, J.M. (2000). Energetically optimal cadence vs. freely chosen cadence during cycling: effect of exercise duration. *International Journal of Sports Medicine*, 20, 1-5.
- Gottshall, J.S., & Palmer, B.M. (2002). The acute effects of prior cycling cadence on running performance and kinematics. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 34, 1518-1522.
- Lepers, R., Hausswirth, C., Maffiuletti, N.A., Brisswalter, J., & Van Hoecke, J. (2000). Evidence of neuromuscular fatigue after prolonged cycling exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 32, 1880-1886.
- Lepers, R., Millet, G.Y., Maffiuletti, N.A., Hausswirth, C., & Brisswalter, J. (2001). Effect of pedalling rates on physiological response during an endurance cycling exercise. *European Journal of Applied Physiology*, 85, 392-395.
- Lepers, R., Maffiuletti, N.A., Rochette, L., Brugniaux, J., & Millet, G.Y. (2002). Neuromuscular fatigue during a long-duration cycling exercise. *Journal of Applied Physiology*, 92, 1487-1493.
- Lucia, A., Hoyos, J., & Chicharro, J.L. (2001). Preferred pedalling cadence in professional cycling. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 33, 1361-66.
- Vercruyssen, F., Hausswirth, C., Smith, D., & Brisswalter, J. (2001). Effet de la durée de l'exercice sur le choix d'une cadence optimale de pédalage chez des triathlètes. *Canadian Journal of Applied Physiology*, 26, 44-54.
- Vercruyssen, F., Brisswalter, J., Hausswirth, C., Bernard, T., Bernard, O., & Vallier, J.M. (2002). Influence of cycling cadence on subsequent running performance in triathletes. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 3, 530-536.