

EFFET DE LA DUREE DE L'EXERCICE SUR LE CHOIX D'UNE CADENCE OPTIMALE DE PEDALAGE CHEZ DES TRIATHLETES

Christophe Hausswirth, Fabrice Vercauysen, D. Smith, Jeanick Brisswalter

► **To cite this version:**

Christophe Hausswirth, Fabrice Vercauysen, D. Smith, Jeanick Brisswalter. EFFET DE LA DUREE DE L'EXERCICE SUR LE CHOIX D'UNE CADENCE OPTIMALE DE PEDALAGE CHEZ DES TRIATHLETES. Canadian Journal of Applied Physiology, Human Kinetics, 2001, 26 (1), pp.44 - 54. hal-01762720

HAL Id: hal-01762720

<https://hal-insep.archives-ouvertes.fr/hal-01762720>

Submitted on 10 Apr 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**EFFET DE LA DUREE DE L'EXERCICE SUR LE CHOIX D'UNE CADENCE
OPTIMALE DE PEDALAGE CHEZ DES TRIATHLETES.**

C. Hausswirth¹, F. Vercruyssen², D. Smith², J. Brisswalter²

¹ Laboratoire de Biomécanique et de Physiologie
Institut National du Sport et de l'Education Physique
11, avenue du Tremblay 75012 Paris, France

² Université de Toulon-Var, Unité Ergonomie Sportive et Performance
Avenue de l'Université, BP 132,
83957 La Garde cedex, FRANCE

³ Consultant Sport Scientist, Goald Coast, Queensland, AUSTRALIA

Auteur responsable de la procédure d'écriture :

C. HAUSSWIRTH, Ph.D
Institut National du Sport et de l'Education Physique
Laboratoire de Biomécanique et de Physiologie
11, avenue du Tremblay 75012 Paris, FRANCE
Tel : 0033-1-41.74.43.85, Fax : 0033-1-41.74.45.35
e-mail: christophe.hausswirth@wanadoo.fr

Titre courant : Triathlon et Cadence optimale de pédalage

Résumé

L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet d'une durée d'exercice, spécifique à la partie cyclisme d'un triathlon de courte distance ($\approx 1h$), sur les facteurs qui déterminent le libre choix d'une cadence de pédalage. Neuf triathlètes entraînés ont réalisé une épreuve de cyclisme sur vélodrome à une vitesse qui représentait 75 % de la fréquence cardiaque maximale. Cette épreuve se composait de cinq paliers sous-maximaux correspondant à cinq cadences distribuées dans un ordre aléatoire (65, 80, 95, 110 tours.min⁻¹ et la cadence librement choisie) réalisés avant et après une heure d'exercice à la fréquence librement choisie. Les résultats montrent qu'au début de l'exercice, les triathlètes adoptent spontanément une cadence ($90,1 \pm 10,7$ tours.min⁻¹) qui se rapproche de l'optimum neuromusculaire ($89,6 \pm 1,1$ tours.min⁻¹) alors qu'en fin d'épreuve, la cadence libre ($82,8 \pm 8,7$ tours.min⁻¹) diminue significativement et se décale vers l'optimum énergétique ($78,6 \pm 5,8$ tours.min⁻¹). La discussion envisage l'hypothèse d'une modification du critère de choix de la cadence avec la durée de l'exercice privilégiant plus une minimisation du coût énergétique que du « coût neuromusculaire ».

Abstract :

The purpose of this study was to investigate the effect of an exercise duration similar to triathlon's cyclism event ($\approx 1h$), on factors determining the freely chosen cadence. Nine trained triathletes completed a cycling track session conducted at a speed corresponding to 75 % of maximal heart rate. This session was composed of five submaximal rides performed at five cadences presented in a random order (65, 80, 95, 110 rpm and freely chosen cadence) realized before and after a one hour exercise at the freely chosen cadence. Results show, during the first condition, that triathletes choose spontaneously a cadence ($90,1 \pm 10,7$ rpm) close to the neuromuscular optimum ($89,6 \pm 1,1$ rpm) while at the end of exercise, a decrease of the freely chosen cadence ($82,8 \pm 8,7$ rpm) was observed towards the energetically optimal cadence ($78,6 \pm 5,8$ rpm). These findings suggest the hypothesis of a adaptation of the movement pattern with the exercise duration in order to minimize the energy cost rather than the neuromuscular cost of cycling.

Mots clefs : Triathlètes / Durée de l'exercice / Optimum énergétique / Optimum neuromusculaire / Cadence librement choisie.

Key words : Triathletes / Exercise duration / Energetical optimum / Neuromuscular optimum / Freely chosen cadence.

Introduction :

Dans les activités cycliques, l'idée selon laquelle tous les systèmes biologiques s'organisent pour produire un moindre coût métabolique, est classiquement évoquée dans la littérature (e.g. Kelso et al., 1981; Nelson, 1983 ; Wilke, 1977).

Dans ce cadre, en course à pied ou en marche athlétique, les sujets adoptent naturellement une fréquence de foulée correspondant au coût énergétique le plus faible (e.g. Holt et al., 1995). Dans ces activités, l'adoption spontanée d'une fréquence énergétiquement optimale est par ailleurs associée à une stabilité maximale du patron locomoteur (Brisswalter et Mottet, 1996 ; Holt et al., 1995).

Par contre, en cyclisme, la relation entre la dépense énergétique et la fréquence gestuelle diffère de celle observée en course à pied. En effet, si la cadence de pédalage énergétiquement optimale semble se situer autour de 60 tours.min⁻¹ chez des sujets quel que soit l'activité pratiquée ou le niveau d'entraînement (e.g., Marsh et Martin, 1997), la fréquence librement choisie (80-90 tours.min⁻¹) des cyclistes est systématiquement supérieure à la cadence la plus économique (Coast et Welch, 1985 ; Hagberg et al., 1981 ; Marsh et Martin, 1993). Plusieurs hypothèses sont émises pour expliquer ce décalage. Parmi celles-ci, les critères de choix d'une cadence de pédalage peuvent représenter, pour une puissance d'exercice donnée, soit la possibilité de minimiser la quantité d'énergie métabolique utilisée (i.e. cadence énergétiquement optimale), soit la possibilité de minimiser la fatigue neuromusculaire (i.e. cadence correspondant à l'optimum neuromusculaire) (Marsh et Martin, 1993, 1997 ; Takaishi et al., 1996, 1998).

Dans certaines activités sportives de longue durée comme le triathlon ou le duathlon, l'athlète réalise successivement une épreuve de course à pied et de cyclisme. Dans ces disciplines, un des principaux facteurs de la performance est la capacité du sujet à minimiser la quantité d'énergie métabolique utilisée (di Prampero, 1986). Dans ce cadre, nous pouvons

émettre l'hypothèse selon laquelle le sujet choisit librement, dans la partie course à pied, une fréquence de foulée correspondant à un coût métabolique minimal, alors que le choix d'une cadence énergétiquement optimale ne semble pas être le critère principal de l'organisation du patron locomoteur au cours de la partie cyclisme. Si de nombreuses études montrent une augmentation du coût énergétique de la course à pied en fin de triathlon (e.g., Hauswirth et al., 1996 ; 1997 ; Guezennec et al., 1996), peu de travaux se sont intéressés aux caractéristiques du coût énergétique durant la partie cyclisme de cette épreuve. Lors d'un triathlon de courte distance (1,5 km natation / 40 km cyclisme / 10 km course à pied), la partie cyclisme représente la plus grande proportion de la durée totale de l'épreuve (≈ 1 heure). Dans ce contexte, le choix d'une cadence de pédalage particulière au cours de l'épreuve peut alors d'une part, modifier les caractéristiques de l'adaptation physiologique en cyclisme et d'autre part, modifier l'adaptation de l'athlète en course à pied (Hauswirth et al., 1997).

A notre connaissance, les effets d'une durée d'exercice supérieures à 6 minutes sur le choix de la cadence de pédalage ont été peu étudiés (Brisswalter et al., 2000 ; Coast et Welch, 1986). Dans un travail récent, Brisswalter et al. (2000) ont observé un déplacement significatif de la cadence énergétiquement optimale vers des cadences beaucoup plus élevées (de 70 à 83 tours.min⁻¹) après un exercice de pédalage de 30 minutes réalisé à 80 % de la puissance maximale (P_{max}). Les auteurs associent ce changement de cadence à une modification du patron de recrutement des fibres musculaires qui, avec la durée de l'exercice, se caractérise par l'utilisation plus importante des fibres de type II. Dans ce cadre, la modification du patron de recrutement musculaire avec la durée de l'exercice s'accompagne d'une augmentation du coût énergétique du cyclisme à toutes les cadences de l'étude (50, 65, 80, 110 tours.min⁻¹) exceptée 95 tours.min⁻¹.

Plusieurs questions peuvent alors être posées, la première concerne l'influence d'une durée d'exercice, identique à celle d'une épreuve de triathlon (≈ 1 heure), sur la détermination

des optimas énergétique et neuromusculaire classiquement décrits dans la littérature, la seconde concerne l'incidence de cette possible variation sur le choix spontané de la cadence de pédalage chez des triathlètes.

Situé dans une perspective d'optimisation de la performance en triathlon, ce travail se propose d'étudier les variations du coût énergétique, de l'EMG intégré ainsi que l'évolution du libre choix de la cadence de pédalage en fonction de la durée de l'exercice chez des triathlètes entraînés.

Méthodes

Les sujets

Neuf triathlètes entraînés (âge : $33,3 \pm 6,5$ ans ; poids : $66,2 \pm 7,3$ kg ; taille : $172,8 \pm 3,7$ cm ; v_{max} cyclisme : $46,2 \pm 1,9$ km.h⁻¹) appartenant au même groupe d'entraînement et de même niveau de performance (régional) ont été volontaires pour participer à cette étude. Tous les sujets ont remplis un consentement écrit concernant les modalités de l'expérimentation.

Paramètres mesurés

Analyse de l'activité électromyographique

Les signaux myoélectriques sont recueillis à la surface du muscle vastus latéralis à partir d'électrodes de détection (mode de réception de type bipolaire). La peau est préalablement décapée (abrasion) de façon à réduire la résistance de l'ensemble électrodes - tissu musculo-cutané (inférieure à 1000 Ω). Une paire d'électrodes de détection (10 mm, Ag-AgCl, Numéris, distance inter-électrodes de 20 mm) est placée parallèlement aux fibres musculaires du vastus latéralis et une électrode de référence est disposée sur la crête illiaque antéro-supérieure. Les signaux myoélectriques sont amplifiés (x 600) et filtrés avec une bande

passante de 6/1500 Hz (Mazet Electronic) puis ils sont enregistrés sur une cassette (appareil KMT D-8, Mini type, Sony). Dans la phase d'acquisition, les signaux enregistrés sont d'une part, numérisés avec une fréquence d'échantillonnage de 1 kHz et d'autre part, stockés sur l'ordinateur avant l'étape d'intégration du signal (logiciel 3D View).

L'enregistrement continu du signal EMG durant les conditions pré et post-exercice est analysé pour chaque cadence de pédalage: 10 bouffées d'activités électromyographiques consécutives sont sélectionnées sur une durée de 10 secondes en fonction de la configuration du signal EMG (amplitude) pour être ensuite intégrées (EMGi). Les valeurs EMGi sont exprimées en unité arbitraire (e.g., Hanon et al., 1998).

Mesure des paramètres ventilatoires et gazeux

L'appareil utilisé est un système d'analyse télémétrique (type Cosmed K4, Rome, Italie) qui permet la mesure des échanges gazeux respiratoires dans les conditions réelles de l'activité physique (e.g., Hausswirth et al., 1997). Le volume d'air expiré ainsi que le nombre de cycles expiratoires par minute sont mesurés par un débitmètre à turbine fixé sur le masque du sujet ; le lecteur opto-électrique du débitmètre permet la mesure de la rotation de la turbine (tour.s^{-1}). Les analyseurs d'O₂ et de CO₂ sont étalonnés avant et après le test.

A partir des valeurs de $\dot{V}O_2$ relevées lors de la dernière minute de chaque palier d'exercice, le coût énergétique (C en $\text{mlO}_2.\text{kg}^{-1}.\text{km}^{-1}$) du cyclisme est calculé en condition aérobie stricte selon l'équation $[C = (\dot{V}O_2 / \text{vitesse de déplacement}) \times 60]$ proposée par di Prampero (1986).

Protocole expérimental

Chaque sujet réalise, sur un vélodrome étalonné, deux épreuves dans une période de 15 jours. La première épreuve est un test progressif maximal en cyclisme qui permet de déterminer la vitesse maximale atteinte en fin d'exercice (v_{max}) ainsi que la fréquence cardiaque maximale (FC max). Lors de cette épreuve, le premier palier est fixé à 22 km.h^{-1} puis l'intensité de l'exercice est incrémentée de 2 km.h^{-1} par palier d'1 minute. Le critère d'atteinte de v_{max} ($46,2 \pm 1,2 \text{ km.h}^{-1}$) est fixé par l'impossibilité pour chaque triathlète de maintenir la vitesse de déplacement pendant la durée d'un palier.

Les valeurs de FC max sont analysées par intervalles de 5 secondes à partir des données enregistrées par les cardiofréquencemètres (*Baumann-Haldi BHL-6000* ; tableau 1). La seconde épreuve est un test réalisé à une vitesse moyenne de $31,6 + 1,5 \text{ km.h}^{-1}$ correspondant à 75 % de FC max. Après un échauffement de 6 minutes à 26 km.h^{-1} , les sujets réalisent un premier test rectangulaire sous maximal (R1) d'une durée de 15 minutes à une intensité constante. Ce test se décompose en intervalles de 3 minutes correspondant à une distribution aléatoire des cadences de 65, 80, 95, 110 tours.min^{-1} et de la fréquence librement choisie (FL). Le même test rectangulaire (R2) est à nouveau réalisé après une épreuve d'une durée d'1 heure réalisée à la même vitesse de pédalage et à la cadence librement choisie. Durant ces deux tests de 15 minutes, les triathlètes sont équipés du système d'analyse télémétrique K4 et d'un appareil d'analyse électromyographique (EMG). Pendant toute la durée de l'épreuve, la vitesse de déplacement et la cadence de pédalage sont contrôlées et enregistrées à l'aide d'un capteur fixé sur le vélo (*Cyclovantage, Polar*). Quatre prélèvements sanguins sont effectués au cours des conditions R1 et R2: avant R1 (L0), après R1 (L1), avant R2 (L2) et immédiatement à l'arrêt de R2 (L3). La variation de la lactatémie (lactate exercice-lactate repos) exprimée en mmol.l^{-1} permet de contrôler le caractère aérobie de l'exercice (di Prampero, 1981).

Traitements statistiques

Les variations des paramètres physiologiques et neuromusculaires au cours de l'épreuve rectangulaire sont étudiées au moyen d'une analyse de variance *ANOVA* à 2 voies (durée x cadence). Les différences existantes entre chaque cadence de pédalage sont identifiées à partir du test *Post-hoc de Newman-Keuls*.

A partir des travaux précédents de la littérature, la cadence énergétiquement optimale et la cadence correspondant à l'optimum neuromusculaire sont déterminées à partir d'une analyse en régression polynomiale quadratique de 2^{ème} degré, respectivement à partir des valeurs de $\dot{V}O_2$ - cadence et EMGi- cadence (Brisswalter et al. 2000 ; Coast et Welch, 1985 ; Marsh et Martin, 1993 ; Seabury et al., 1977). Sur la courbe de tendance, le point le plus bas représente l'optimum énergétique ou l'optimum neuromusculaire. Une différence de ces optima entre les deux périodes est analysée à partir d'un test de *t. de Student*. La signification est fixée à $p < 0,05$.

Résultats

Les valeurs du coût énergétique (C) et de l'EMG intégré (EMGi) sont présentées dans le tableau 3. L'*ANOVA* n'a révélé aucun effet global de la durée de l'exercice sur les valeurs du coût énergétique. A l'inverse, un effet significatif de la durée est observé sur les valeurs EMGi. A la fin de l'épreuve, une augmentation significative de l'EMGi est relevée pour les cadences de 65, 110 tours.min⁻¹ ainsi qu'à la fréquence librement choisie.

Quelle que soit la période, un effet de la cadence de pédalage a été observé sur les valeurs de C et d'EMGi. Les valeurs révèlent que les valeurs de C obtenues à 110 tours.min⁻¹ sont significativement supérieures à celles obtenues à 65 et 80 tours.min⁻¹ en condition R1 et à celles obtenues à toutes les cadences de pédalage en condition R2. Les valeurs EMGi obtenues pour chaque cadence de pédalage sont significativement différentes de la cadence précédente quelle

que soit la période. Enfin, un effet de la durée a été observé sur le libre choix de la cadence de pédalage (respectivement pour R1 vs. R2 : $90,1 \pm 10,7$ vs. $82,8 \pm 8,7$ tours.min⁻¹) malgré une vitesse de déplacement constante.

L'analyse en régression polynomiale de 2^{ème} degré indique au cours de la première condition une zone optimale de C entre 65 et 80 t.min⁻¹ (figure 1) alors qu'une cadence énergétiquement optimale est identifiée lors de R2 ($78,6 \pm 5,8$ t.min⁻¹). Quelle que soit la période, un optimum neuromusculaire est identifié pour une cadence moyenne de 90 tours.min⁻¹. Aucun effet de la durée de l'exercice n'est observée sur cette valeur. Avec la durée de l'exercice, les valeurs de la lactatémie diminuent significativement au cours de l'exercice (entre L1 et L2 ou entre L1 et L3) et indiquent une sollicitation préférentielle du métabolisme aérobie au cours de l'exercice (di Prampero, 1981).

Discussion

Dans la plupart des activités de longue durée (marche athlétique, marathon, triathlon), il est classiquement décrit une élévation du coût énergétique de la locomotion avec l'augmentation de la durée de l'exercice (Brisswalter et al., 2000; Brueckner et al., 1991 ; Guezennec et al., 1996 ; Hausswirth et al., 1996, 1997 ; Hue et al., 1998 ; Sproule, 1998 ; Xu et Montgomery, 1995). Cette augmentation est systématique pour des exercices supérieures à 90 minutes (e.g. Hausswirth et al., 1996 ; 1997). Par contre, pour des durées d'exercice moindres, cette modification du coût énergétique n'est pas toujours observée (Dressendorfer, 1991 ; Martin et al., 1987 ; Morgan et al., 1990). Ainsi, nous n'observons aucun effet de la durée de l'exercice sur le coût énergétique mesuré à la cadence librement choisie. Ce résultat peut être, pour une part, discuté à partir de l'étude de Brueckner et al. (1991) qui ne montre pas d'effet d'une course prolongée d'une durée d'1 heure sur le coût énergétique de l'activité alors qu'une augmentation significative est observée à partir de 90 minutes d'exercice.

Par ailleurs, l'analyse des données de notre travail met en évidence d'une part, un effet de la durée de l'exercice sur la détermination d'un optimum énergétique en condition R2, et d'autre part, sur le libre choix de la cadence de pédalage. Au début de l'épreuve, les triathlètes choisissent librement une cadence de $90,1 \pm 10,7$ tours.min⁻¹ proche de l'optimum neuromusculaire ($89,6 \pm 1,1$ tours.min⁻¹). Par contre, en fin d'épreuve, les triathlètes utilisent une fréquence librement choisie de $82,8 \pm 8,7$ tours.min⁻¹ qui se distingue significativement de l'optimum neuromusculaire ($91,3 \pm 0,7$ tours.min⁻¹) et se rapproche de l'optimum énergétique ($78,6 \pm 5,8$ tours.min⁻¹).

Les résultats observés en début d'exercice sont comparables avec ceux décrits dans la littérature qui indiquent, d'une part une zone minimale de fatigue neuromusculaire (moindre signal EMGi) qui se situe entre 80 et 90 tours.min⁻¹ chez des cyclistes, d'autre part des valeurs de cadence librement choisie proches de cet optimum (Neptune et al., 1999 ; Takaishi et al., 1996, 1998). Dans cette perspective, l'optimum neuromusculaire est lié à une réduction de la sensation de tension musculaire (stress périphérique) responsable en partie de la fatigue neuromusculaire et à une moindre force de pédalage appliquée sur les manivelles lors de chaque contraction musculaire (Patterson et al., 1990 ; Takaishi et al., 1994 ; 1996 ; 1998). La détermination d'une cadence optimale se traduit ainsi dans notre travail par un signal EMGi plus important aux faibles cadences, qui correspondent à des tensions musculaires importantes (65 tours.min⁻¹), ou aux cadences élevées qui correspondent à des vitesses de contractions rapides (cadences > 95 tours.min⁻¹) (Sargeant, 1996). Durant cette période, nos résultats sont en accord avec l'hypothèse selon laquelle le choix de la cadence préférée des sujets, en début d'exercice, est associée à un principe de minimisation de la fatigue neuromusculaire et de la force appliquée sur les pédales. Par ailleurs, durant cette période l'étude des relations $\dot{V}O_2$ -cadence ne nous a pas permis de déterminer une cadence énergétiquement optimale pour chaque sujet. L'observation en début d'exercice d'une zone énergétiquement optimale entre

65-80 tours.min⁻¹ est comparable aux résultats présentés par Coast et Welch, (1985) ou Marsh et Martin, (1993) qui indiquent que, pour de faibles puissances d'exercice (< 200 W), il est observé plus une zone énergétiquement optimale qu'une cadence optimale.

Par contre, en fin d'épreuve, nos résultats indiquent une modification de la relation coût énergétique- cadence qui permet d'identifier une cadence énergétiquement optimale (78,6 ± 5,8 tours.min⁻¹). L'observation de cet optimum énergétique pour une puissance de travail constante est similaire aux résultats de Brisswalter et al. (2000) qui montrent à la suite d'un exercice de pédalage (30 minutes) un décalage de l'optimum énergétique vers des cadences plus élevées (de 70 ± 4,5 tours.min⁻¹ à 83 ± 6,2 tours.min⁻¹, P<.05). Une explication possible de ces différentes observations pourrait être liée à une modification du recrutement musculaire avec la durée de l'exercice. En effet, la réalisation d'un exercice de pédalage à différentes cadences et/ou à différentes puissances correspond à des vitesses de contractions différentes et donc à une contribution relative des types de fibres musculaires différentes (Barstow et al., 1996 ; Sargeant, 1996 ; Suzuki, 1979). D'autre part, avec la durée de l'exercice, il est reporté une utilisation prioritaire des fibres de type I suivie par un recrutement des fibres de type II (e.g., Gollnick et al., 1974). Nous pouvons alors suggérer que le recrutement des fibres de type II (énergétiquement moins efficaces) qui est prioritaire aux cadences basses et élevées (65 et 110 tours.min⁻¹) se trouve accentué avec la durée de l'exercice et se traduit par l'augmentation de l'EMGi et du coût énergétique durant R2 à 65 et 110 tours.min⁻¹, permettant l'identification d'une cadence énergétiquement optimale à 78,6 ± 5,8 tours.min⁻¹.

Dans ce contexte, le choix de la cadence de pédalage par nos sujets semble se modifier en fin d'épreuve favorisant la minimisation du coût énergétique de la locomotion. Les relations entre la cadence énergétiquement optimale et la cadence librement choisie restent peu claires en cyclisme et plusieurs études récentes suggèrent que le libre choix d'une cadence

de pédalage est déterminé par une minimisation de la fatigue neuromusculaire (Takaishi et al., 1996 ; 1998). Au début de l'exercice, nos résultats sont en accord avec cette hypothèse, par contre nos observations suggèrent que la réduction de la cadence librement choisie avec l'augmentation de la durée de l'exercice correspond à une réorganisation du patron de mouvement qui serait plus associée à une minimisation de la dépense énergétique que de la fatigue neuromusculaire. Cette hypothèse repose sur l'idée selon laquelle la locomotion humaine est un système soumis à des principes physiques d'auto-organisation qui déterminent le patron locomoteur en fonction d'une interaction particulière entre les contraintes de l'activité et celles du sujet (Kelso et al., 1981 ; Holt et al., 1995 ; Sparrow, 1983 ; Wilke et al., 1977). Ainsi, la tendance des sujets à minimiser le coût énergétique en fin d'épreuve caractérise d'une part, l'adaptation physiologique des triathlètes à un exercice de longue durée et d'autre part, peut constituer, pour ce type de population, un facteur favorisant la performance dans la dernière épreuve du triathlon.

En conclusion, les observations de l'étude indiquent que le critère qui détermine le choix d'une cadence de pédalage se modifie avec la durée de l'exercice. Dans notre étude l'hypothèse selon laquelle choix d'une cadence de pédalage est associé à une minimisation de la fatigue neuromusculaire ne semble plus validée après 1h de pédalage. Par ailleurs nous avons observé un rapprochement entre la cadence librement choisie et la cadence énergétiquement optimale. Dans ce cadre des études ultérieures sont nécessaires pour identifier les facteurs qui déterminent cette réorganisation du mouvement en cyclisme à l'issue d'une épreuve de longue durée.

Références :

- Barstow, T.J., Jones, A.M., Nguyen, P.H., Casabury, R. (1996) Influence of muscle fiber type and pedal frequency on oxygen uptake kinetics of heavy exercise. *J. Appl. Physiol.* 81 : 1642-1650.
- Brisswalter, J., Hausswirth, C., Smith, D., Vercruyssen, F., and Vallier, J.M. (2000). Energetically optimal cadence vs. Freely-chosen cadence during cycling : Effect of exercise duration. *Int. J. Sports Med.* 20 : 1-5.
- Brisswalter, J., Mottet, D. (1996) Energy cost and stride duration at preferred transition gait speed between walking and running. *Can. J. Appl. Physiol.*, 21(6), 471-480.
- Brisswalter, J., Hausswirth, C., Vercruyssen, F., Collardeau, M., Vallier, J.M., Lepers, R., and Goubault, C. (2000). Carbohydrate ingestion does not influence the change in energy cost during a 2-h run in well-trained triathletes. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 81 :108-113.
- Brueckner, J.C., Atchou, G., Capelli, C., Duvallet, A., Jousselin, E., and Rieu, M. (1991). The energy cost of running increases with the distance covered. *Eur. J. Appl. Physiol.* 62 : 385-389.
- Coast, J.R, Cox, R.H, and Welch, H.G. (1986). Optimal pedalling rate in prolonged bouts of cycle ergometry. *Med. Sci. Sports Exerc.* 18 : 225-230.
- Coast, J.R, and Welch, H.G. (1985). Linear increase in optimal pedal rate with increased power output in cycle ergometry. *Eur. J. Appl. Physiol.* 53 : 339-342.
- di Prampero, P.E. (1981). Energetics of muscular exercise. *Rev. Physiol. Biochim. Pharmacol.* 89 : 144-222.

- di Prampero, P.E. (1986). The energy cost of human locomotion on land and in water. *Int. J. Sports Med.* 7 : 55-72.
- Dressendorfer, R. (1991). Accute reduction in maximal oxygen uptake after long distance running. *Int. J. Sports Med.* 12 : 30-33.
- Guezennec, C.Y., Vallier, J.M, Bigard, A.X., and Durey, A. (1996). Increase in energy cost of running at the end of a triathlon. *Eur. J. Appl. Physiol.* 73 : 440-445.
- Gollnick, P.D., Piehl, K., Saltin, B. (1974) Selective glycogen depletion pattern in human muscle fibers after exercise of varying intensity and at varying pedal rates. *J. Physiol.* 214 : 45-57.
- Hagberg, J.M., Mullin, J.P., Giese, M.D., and Spitzagel, E. (1981). Effect of pedaling rate on submaximal exercise reponses of competitive cyclists. *J. Appl. Physiol.* 51: 447-451.
- Hanon, C., Thepaut-Mathieu, C., Hausswirth, C., and Le Chevalier, J.M. (1998). Electromyogram as an indicator of neuromuscular fatigue during incremental exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.* 78 : 315-323.
- Hausswirth, C., Bigard, A.X., Berthelot, M., and Guezennec, C.Y. (1996). Variability in energy cost of running at the end of a triathlon and a marathon. *Int. J. Sports Med.* 17 : 574-581.
- Hausswirth, C., Bigard, A.X., and Guezennec, C.Y. (1997). Relationships between mechanics and energy cost of running at the end of a triathlon and a marathon. *Int. J. Sports Med.* 18 : 1-10.
- Hausswirth, C., Bigard, A.X., and Le chevalier, J.M. (1997). The Cosmed K4 telemetry system as an accurate device for oxygen uptake measurement during exercise. *Int. J. Sports Med.* 18 : 449-453.

- Holt, K.G., Jeng, S.F., Ratcliffe, R., and Hamill, J. (1995). Energetic cost and stability during human walking human walking at the preferred stride frequency. *J. Mot. Behav.* 27(2) : 164-178.
- Hue, O., Le Gallais, D., Chollet, D., Boussana, A., and Prefaut, C. (1999). The influence of prior cycling on biomechanical and cardiorespiratory response profiles during running in triathletes. *Eur. J. Appl. Physiol.* 77 : 98-105.
- Kelso, J.A.S., Holt, K.G., Rubin, P., and Kigler, P.N. (1981). Pattern of human interlimb coordination emerge from the properties of nonlinear limit cycle oscillatory processes : theory and data. *J. Mot. Behav.* 13 : 226-61.
- Marsh, A.P., and Martin, P.E. (1993). The association between cycling experience and preferred and most economical cadences. *Med. Sci. Sports Exerc.* 25 (11) :1269-1274.
- Marsh, A.P., and Martin, P.E. (1997). Effect of cycling experience, aerobic power, and power output on preferred and most economical cycling cadences. *Med. Sci. Sports Exerc.* 29 (9) : 1225-1232.
- Martin, P.E, Fernhall, B., Krahenbuhl, G.S. (1987). The effects of workout intensity on running economy and mechanics (abstract). *The Hong Kong Sports Medicine Conference, Hong Kong, 15.*
- Morgan, D.W., Martin, P.E., Baldini, F.D., Krahenbuhl, G.S. (1990). Effects of a prolonged maximal run on running economy and running mechanics. *Med. Sci. Sports Exerc.* 22 (6) : 834-840.
- Nelson, W. (1983). Physical principles for economies of skilled movement. *Biol. Cybern.* 46 :135-47.
- Neptune, R.R., and Hull, M.L. (1999). A theoretical analysis of preferred pedaling rate selection in endurance cycling. *J. Biomech.* 32 : 409-415.

- Patterson, R.P., and Moreno, M.I. (1990). Bicycle pedaling forces as a function of pedaling rate and power output. *Med. Sci. Sports Exerc.* 22 : 512-526.
- Sargeant, A.J. Human power output - Determinants of maximum performance. In Marconnet, P., Saltin, B., Komi, P., Poortmans, J (eds) : **Human Muscular Function during Dynamic Exercise**. Basel, Karger, 1996, pp 10-20.
- Seabury, J.J., Adams, W.C., and Ramey, M.R. (1977). Influence of pedaling rate and power output on energy expenditure during bicycle ergometry. *Ergonomics*. 20 : 491-498.
- Sparrow, W.A. (1983). The efficiency of skilled performance. *J. Mot. Behav.* 15 : 237-261.
- Sproule, J. (1998). The influence of either no fluid or carbohydrate-electrolyte fluid ingestion and the environnement (thermoneutral versus hot and humid) on running economy after prolonged, high-intensity exercise. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 77 (6) :536-542.
- Takaishi, T., Yamamoto, T., Ono, T.Y., Ito, T., and Moritani, T. (1998). Neuromuscular, metabolic, and kinetic adaptations for skilled pedaling performance in cyclists. *Med. Sci. Sports Exerc.* 30 (3) : 442-9.
- Takaishi T., Yasuda, Y., and Moritani, T. (1994). Neuromuscular fatigue during prolonged pedalling exercise at different pedalling rate. *Eur. J. Appl. Physiol.* 69 : 154-158.
- Takaishi T., Yasuda, Y., Ono, T., and Moritani, T. (1996). Optimal pedaling estimated from neuromuscular fatigue for cyclists. *Med. Sci. Sports Exerc.* 28 (12) : 1492-1497.
- Suzuki (1979). Mechanical efficiency of fast and slow twitch muscle fibers in man during cycling. *J. Appl. Physiol.* 47 (2) : 263-267.
- Xu, F., and Montgomery, D.L. (1995). Effects of prolonged exercise at 65 % and 85 % of $\dot{V}O_2$ max on running economy. . *Int. J. Sports Med.* 16 :309-315.
- Wilke, J.T. (1977). Ultradian biological periodicities in the integration of behaviour. *Int. J. Neuros.* 7 : 125-143.

Tableau 1- Caractéristiques des sujets de l'étude (n=9).

Age (ans)	Poids (kg)	Taille (cm)	Vmax (km.h ⁻¹)	FC max (bat.min ⁻¹)
33.3 ± 6.5	66.2 ± 7.3	172.8 ± 3.7	46.2 ± 1.9	178.6 ± 8.8

Tableau 2- Valeurs moyennes et écart-types du coût énergétique et de l'activité électromyographique (EMGi en u.a. : unité arbitraire) au cours des conditions pré et post-exercice de l'étude.

Cadences (en t.min ⁻¹)		65	80	95	110	FL
CE (mlO ₂ .kg ⁻¹ .km ⁻¹)	Pré	100.7	100.3	106.8	110.0	104.7
		±12.8	±12.3	±10.7	± 9.6	±12.8
	Post	104.6	102.1	105.4	114.1 ^b	103.9 ^b
		±13.1	±12.1	±11.9	±12.6	±14.8
EMGi (en u.a.)	Pré	36.1	29.1 ^b	26.0 ^b	33.1 ^b	25.4 ^b
		± 0.8	± 0.5	± 0.35	± 0.7	± 0.52
	Post	38.1 ^a	28.6 ^b	26.2 ^b	32.2 ^{ab}	26.9 ^{ab}
		± 1.01	± 0.37	± 0.45	± 0.69	± 0.6

^a (Anova ; p<0,05) différences significatives entre la condition pré et post-exercice.

^b (Post-Hoc Newmann-keuls ; p<0,05) différences significatives entre cette cadence et la cadence précédente.

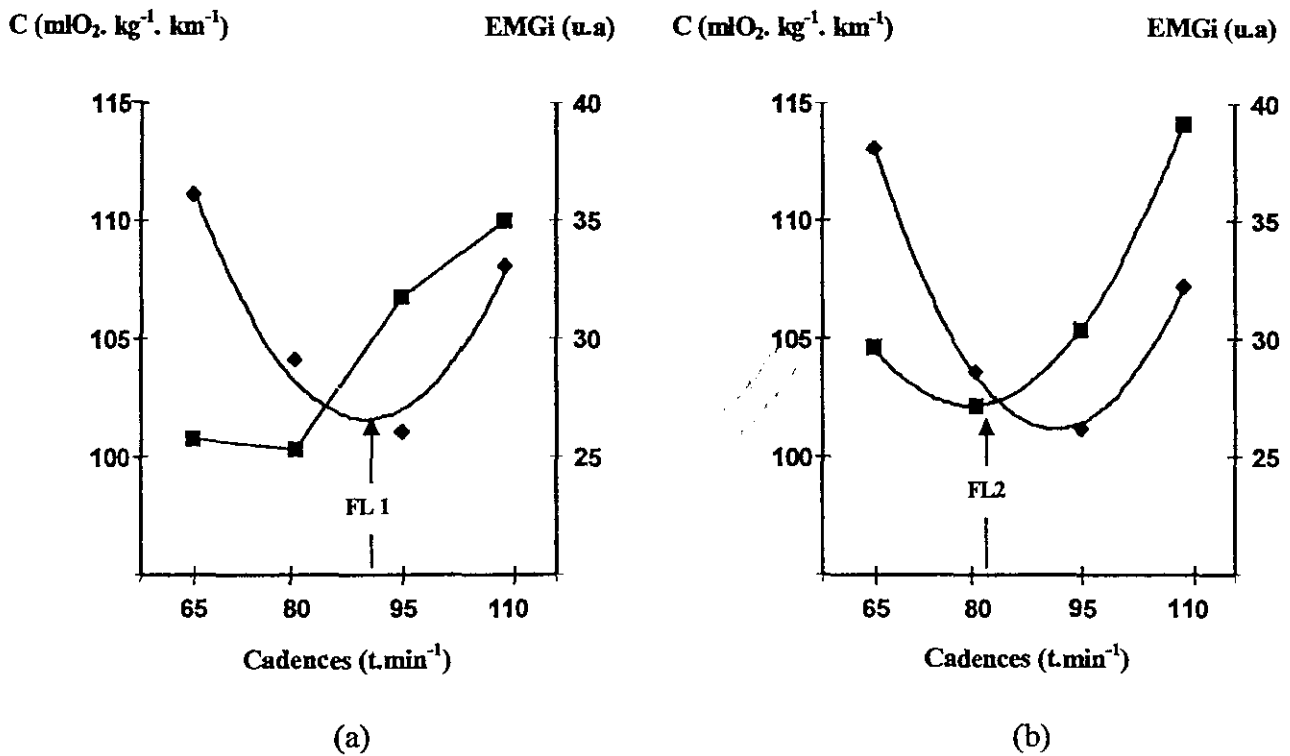
Tableau 3- Evolution de la lactatémie chez les sujets au cours de l'épreuve. L correspond au prélèvement effectué dans chacune des conditions expérimentales.

Lactatémie (mmol.L ⁻¹)		
Pré-exercice	Repos (L0)	1.5 ± 0.5
	L1	3.8 ± 1.6
Post-exercice	L2	2.4 ± 1 ^a
	L3	2.5 ± 1.2 ^{ab}

^a(Anova ; p<0,05) différences significatives entre la période pré et post-exercice

^b(Anova ; p<0,05) différences significatives avec le prélèvement précédent

Figure 1- Variations de C et de l'EMGi en fonction de la cadence de pédalage avant (a) et après une heure de pédalage (b)



- valeurs du coût énergétique (C)
- ◆ valeurs de l'EMGi
- FL1 fréquence librement choisie lors de la première période (R1)
- FL2 fréquence librement choisie lors de la seconde période (R2)