



HAL
open science

EVOLUTION DE LA DEPENSE ENERGETIQUE EN CYCLISME EN FONCTION DU CHOIX DE DIFFERENTES CADENCES DE PEDALAGE ET DE LA DUREE DE L'EXERCICE

Christophe Hausswirth, Jean-Marc Vallier, Jeanick Brisswalter, Patrick
Dréano, Pierre Houseaux

► **To cite this version:**

Christophe Hausswirth, Jean-Marc Vallier, Jeanick Brisswalter, Patrick Dréano, Pierre Houseaux. EVOLUTION DE LA DEPENSE ENERGETIQUE EN CYCLISME EN FONCTION DU CHOIX DE DIFFERENTES CADENCES DE PEDALAGE ET DE LA DUREE DE L'EXERCICE. [Rapport de recherche] Rapport du Projet de Recherche n°287, Institut National du Sport et de l'Éducation Physique (INSEP). 2000. hal-01949757

HAL Id: hal-01949757

<https://insep.hal.science/hal-01949757>

Submitted on 10 Dec 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.



DEPARTEMENT DES SCIENCES DU SPORT

Laboratoire de Biomécanique et Physiologie

**EVOLUTION DE LA DEPENSE ENERGETIQUE EN CYCLISME EN
FONCTION DU CHOIX DE DIFFERENTES CADENCES DE
PEDALAGE ET DE LA DUREE DE L'EXERCICE.**

Dossier Scientifique présenté par

Christophe HAUSSWIRTH¹,

Collaborateurs scientifiques : J.M. VALLIER², J. BRISSWALTER²

Collaborateurs fédéraux : Patrick DREANO³, Pierre HOUSEAUX³

Publications scientifiques liées au projet : 1- *Canadian Journal Applied Physiology*

2- *International Journal of Sports Medicine*

Travail effectué par

Laboratoire de Biomécanique et Physiologie - INSEP¹

En collaboration avec

Université de Toulon-Var, Unité Ergonomie Sportive et Performance²

Fédération Française de Triathlon³

DEPARTEMENT DES SCIENCES DU SPORT

Laboratoire de Biomécanique et Physiologie

Publications scientifiques liées au projet

1. C. HAUSSWIRTH, F. VERCRUYSEN, D. SMITH, J. BRISSWALTER. Effet de la durée de l'exercice sur le choix d'une cadence optimale de pédalage chez des triathlètes. Can J Appl Physiol (accepté oct. 2000), sous-presse 2001.
2. J. BRISSWALTER, C. HAUSSWIRTH, D. SMITH, F. VERCRUYSEN, JM. VALLIER. Energetically optimal cadence vs. freely-chosen cadence during cycling : effect of exercise duration. Int J Sports Med 20 :60-64, 2000

Communication scientifique liées au projet

C. HAUSSWIRTH, J. BRISSWALTER. Effect of exercise duration on optimal pedalling rate in well trained triathletes.. *European College of Sport Sciences*, Rome, juillet 1999.

**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.

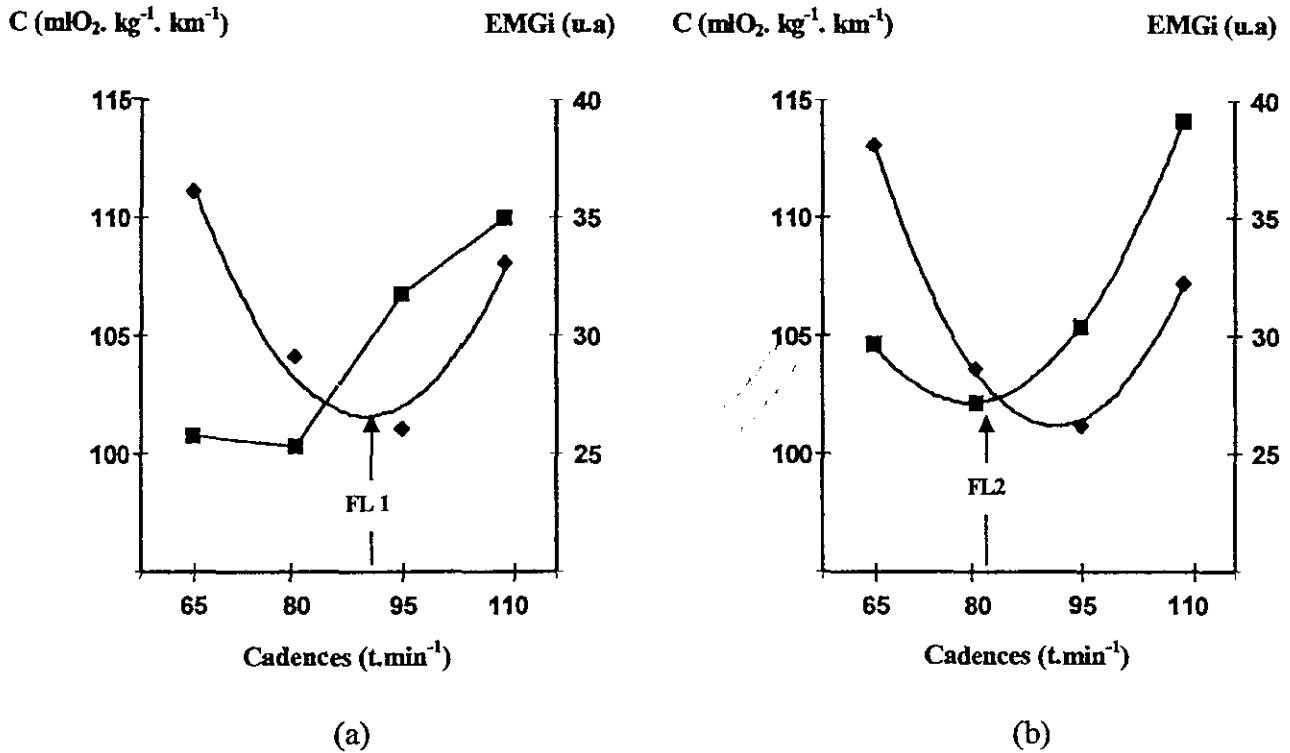
Tableau 3- Evolution de la lactatémie chez les sujets au cours de l'épreuve. L correspond au prélèvement effectué dans chacune des conditions expérimentales.

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)

Energetically Optimal Cadence vs. Freely-Chosen Cadence During Cycling: Effect of Exercise Duration

J. Brisswalter¹, C. Hausswirth², D. Smith³, F. Vercruyssen⁴, J. M. Vallier⁵

¹Université de Toulon-Var, France

²Laboratoire de Physiologie et Biomécanique, INSEP, Paris, France

³Queensland Academy of Sport Triathlon, Brisbane, Australia

⁴LAPMH, Université de Poitiers, France

⁵Service Médical, INSEP, Paris, France

Brisswalter J, Hausswirth C, Smith D, Vercruyssen F, Vallier JM. Energetically Optimal Cadence vs. Freely-Chosen Cadence During Cycling: Effect of Exercise Duration. *Int J Sports Med* 1999; 20: 60–64

Accepted after revision: July 19, 1999

The purpose of this study was to examine the relationship between cadence and oxygen consumption with exercise duration. Ten triathletes who trained regularly were examined. The first test was always a maximal test to determine maximal oxygen uptake ($\dot{V}O_2\text{max}$). The other sessions were composed of six submaximal tests representing 80% of the maximal power reached with $\dot{V}O_2\text{max}$ (P_{max}). During these tests submaximal rides with a duration of 30 min were performed. Each test represented, in a randomised order, one of the following pedal rates: 50, 65, 80, 95, 110 rpm and a freely-chosen rate. $\dot{V}O_2$, respiratory parameters, and heart rate were monitored continuously. Two periods, between the 3rd and the 6th minute and between the 25th and the 28th minute, were analysed. Results showed that when $\dot{V}O_2$ and heart rate were plotted against cadence, each curve could be best described by a parabolic function, whatever the period. Furthermore, a significant effect of period was found on energetically optimal cadence (70 ± 4.5 vs. 86 ± 6.2 rpm, $P < 0.05$). Only during the second period was no significant difference found between freely-chosen cadence (83 ± 6.9 rpm) and energetically optimal cadence ($P > 0.05$). In conclusion, our results suggest that during prolonged exercise triathletes choose a cadence that is close to the energetically optimal cadence. A change of muscle fibre recruitment pattern with exercise duration and cadence would explain the shift in energetically optimal rate towards a higher pedal rate observed at the end of exercise.

■ Key words: Cadence, locomotion, oxygen uptake, fatigue.

Introduction

In long distance events (e.g. triathlon, marathon, race walking...) the maximal speed that athletes can sustain depends on the capacity of the subject to support the highest fraction of $\dot{V}O_2\text{max}$ and to spend the lowest amount of metabolic energy during the whole race [14]. In this case the energy cost of locomotion, defined as the amount of energy spent per unit distance, contributes significantly to long duration performance [4, 7, 13, 32, 37]. It is well-known that the energy cost of locomotion also reflects the biomechanical demand associated with changes in movement pattern [17, 41]. Therefore in order to minimise the energy cost of locomotion, the choice of a particular cadence in cycling or running is classically evoked by coaches and researchers. For running or walking the relationship between movement frequencies and energy cost has been widely studied, often suggesting that the performer spontaneously adopts the pattern of locomotion leading to the lowest energy cost [6, 23, 24]. This does not appear to be the case for cycling. On the one hand the energetically optimal cadence ranges from 40 rpm to 80 rpm in trained or untrained cyclists [10, 11, 16, 17], but on the other hand observations of cyclists often reveal that the freely chosen cadence is significantly higher than the most economical cadence (e.g., [17]). The following functional assumptions have been made to explain this apparent conflict: changes in pedalling forces [34], neuromuscular activation [30], or variation in ventilatory parameters [20]. However, results remain inconsistent, thus highlighting the difficulty in identifying factors that affect the relationship between energy cost and cadence [15, 28, 29]. In fact optimisation principles governing locomotion for cycling are probably as numerous as for other forms of locomotion, and thus the adoption of a specific locomotor pattern could be seen as a function of a) the task constraints and b) the constraints of the performer [25, 31].

The main constraint occurring during long distance events is the exercise duration. Previous studies conducted on marathon runners [7], racewalkers [4], and triathletes [18, 21, 22, 26] have observed a significant increase in energy cost of locomotion with exercise duration leading to the adoption of a specific pattern of locomotion during fatigue [4, 22]. A number of mechanisms have been hypothesized to account for this increase in energy cost. During moderate to high intensity exercise the hypothesis that $\dot{V}O_2$ rise during prolonged exercise is related to the recruitment of type II muscle fibres is often sug-

Table 1 Characteristics of the subjects

Age (years)	mass (kg)	height (cm)	$\dot{V}O_{2\max}$ ($\text{ml} \times \text{kg}^{-1} \times \text{min}^{-1}$)	HR_{\max} (bpm)	P_{\max} (watts)	LA_{\max} ($\text{mmol} \times \text{L}^{-1}$)	RER_{\max}
26 \pm 2	67.5 \pm 3	178 \pm 3.3	66.4 \pm 3.4	187.3 \pm 6	376.5 \pm 20	15.8 \pm 2.3	1.21 \pm 0.03

gested [18, 35]. Moreover, during cycling a preferential recruitment of type II fibres seems to occur at low (< 50 rpm) and at high pedal rates (< 100 rpm) [36]. These observations raise two questions, one concerning the effect of fatigue on the choice of a particular cycling cadence and the other concerning the consequences of this choice on the energy cost increase with exercise duration. The principal purpose of this study was therefore to investigate whether the relationship between energetically optimal and freely-chosen cadence was affected by prolonged endurance exercise. A second objective was to examine the effect of pedal rate on $\dot{V}O_2$ rise (i.e. energy cost increase) during constant intensity prolonged cycling.

Materials and Methods

Subjects

The subjects were ten triathletes in regular training. The physical characteristics of the subjects are given in Table 1. Before participating in this study, subjects were fully informed about protocol, and informed consent was obtained prior to all testing.

Experimental design

Each subject completed 7 testing sessions during a 3 week period without any other training program. Each session was separated by a 48 h rest period. An electromagnetically braked ergometer, equipped with the triathlete's own pedals and toe-clips and adjusted to the dimensions of their own bicycle, was used during all testing. The first session, performed at freely-chosen cadence, was used to accustom subjects to the laboratory and to determine $\dot{V}O_{2\max}$ ($\text{ml} \times \text{min}^{-1} \times \text{kg}^{-1}$). After 6 min at 100 W the power output was increased by 25 W each minute until exhaustion. $\dot{V}O_{2\max}$ was attained with a plateau in $\dot{V}O_2$, an expiratory ratio of 1.15 or greater and a post blood lactate level above $8 \text{ mmol} \times \text{L}^{-1}$. The other sessions were composed of a 6 min control ride followed by a 30 min submaximal test, at 80% of the maximal power reached with $\dot{V}O_{2\max}$ (P_{\max}). For each test, after the control ride caused out at the preferred cadence, one of the following pedal rates 50, 65, 80, 95, 110 rpm or a freely-chosen rate was presented in a random order. Cadence, $\dot{V}O_2$, respiratory parameters (VE, RF, RER), and heart rate (HR) were monitored continuously. Lactate was measured by enzymatic method (Yellow Springs Instruments Model 24L) from a finger blood sample taken at rest and immediately at the end of the exercise. Two periods, between the 3rd – 6th and the 25th – 28th min, were analysed.

Statistical analysis

All data are expressed as mean \pm SD. Short term variability between trial tests was analysed, first using repeated measures ANOVA on $\dot{V}O_2$, respiratory parameters, heart rate, and cadence recorded during the control rides. Coefficients of varia-

tion (SD/mean \times 100) were then calculated for each subject [3, 5]. Based on previous studies, the relation between cadence and $\dot{V}O_2$ for each subject was fitted using a polynomial regression with a quadratic model [10, 11, 28, 29]. The minimum point of the curve represented the energetically optimal cadence. Firstly a 2-way MANOVA (period \times cadence) was performed using $\dot{V}O_2$ respiratory parameters and heart rate as pendant variables (Statistica ver. 5). A one-way ANOVA was performed to analyse the effect of cadence on lactate values recorded at the end of each test. For all analyses Newman-Keuls post hoc test was employed to determine differences among pedal rates. A paired t-test was used to test differences in freely-chosen cadence between the two periods and differences between the energetically optimal and freely-chosen cadence. For all the statistical analyses the level of significance was set at $P < 0.05$.

Results

Maximal test

The maximal values obtained during the first session are presented in Table 1. The RER values and peak post-exercise blood lactate levels (LA_{\max}) indicate the achievement of $\dot{V}O_2$ criteria and permitted using a P_{\max} value.

Submaximal test

No significant difference in $\dot{V}O_2$ was found. The mean coefficient of variation for $\dot{V}O_2$ was $2.8 \pm 0.4\%$ ($P > 0.05$). Furthermore, the coefficient of variation of freely-chosen cadence was small for all subjects (mean = 1.8; range : 1.5 – 2.3) indicating that the preferred cadence of these triathletes was stable at 80% P_{\max} .

Data on cardio-respiratory responses at different pedal rates are presented in Table 2. Analysis of variance showed that $\dot{V}O_2$ and heart rate were different among pedal rates whatever the period. When $\dot{V}O_2$ was plotted against pedal rate using a quadratic model, mean values of regression coefficients for $\dot{V}O_2$ during the first and the second period were $r = 0.90$ (range 0.87 – 0.96) and $r = 0.98$ (range = 0.96 – 0.99) respectively (Fig. 1).

A significant effect of period was found for $\dot{V}O_2$ and for energetically optimal cadence. The lowest point of the graph was found for the first and the second period at 70 ± 4.5 and 86 ± 6.2 rpm, respectively ($P < 0.05$). A significant increase in oxygen uptake was observed with exercise duration for all pedal rates except for 95 rpm ($P > 0.05$). The most important rise in $\dot{V}O_2$ ($\Delta\dot{V}O_2 = \dot{V}O_{2\text{period 2}} - \dot{V}O_{2\text{period 1}}$) was found at 110 rpm ($\Delta\dot{V}O_2 = 4.9 + 0.33 \text{ ml} \times \text{kg}^{-1} \times \text{min}^{-1}$) while at 95 rpm $\Delta\dot{V}O_2$ was equal to $1.9 + 0.42 \text{ ml} \times \text{kg}^{-1} \times \text{min}^{-1}$ (Fig. 2). Furthermore, for the second period blood lactate levels and VE values were significantly higher at 110 rpm than at the other pedal rates ($P < 0.05$, Fig. 3).

Table 2 Mean oxygen uptake ($\dot{V}O_2$), ventilation (VE), heart rate (HR), and lactate concentration (LA) associated with the 5 controlled and the freely chosen (FC) cycling cadences

Cadences (rev \times min ⁻¹)		50	60	80	95	110	FC
$\dot{V}O_2$ (ml \times kg ⁻¹ \times min ⁻¹)	Period 1	53.1 \pm 3	50.2 \pm 4.5 ^b	49.8 \pm 4.5	52.1 \pm 3.7 ^b	52.8 \pm 4.2	50.4 \pm 4.5
	Period 2	56.8 \pm 4 ^a	55.4 \pm 4.7 ^a	53.8 \pm 4 ^{ab}	54.1 \pm 5.1	57.6 \pm 4.2 ^{ab}	53.9 \pm 4.1 ^a
VE (l \times min ⁻¹)	Period 1	92.4 \pm 10	92.2 \pm 9	89.1 \pm 8	89.8 \pm 11	102 \pm 15 ^b	89.2 \pm 9
	Period 2	111.2 \pm 9 ^a	106.8 \pm 13 ^a	104.4 \pm 11 ^a	106.4 \pm 11 ^a	128.9 \pm 18 ^{ab}	107.6 \pm 13 ^a
HR (bpm)	Period 1	162 \pm 15	156 \pm 11 ^b	157 \pm 16	160 \pm 14	167 \pm 16 ^b	158 \pm 11
	Period 2	172 \pm 11 ^a	170 \pm 13 ^a	166 \pm 13 ^{ab}	168 \pm 12 ^a	175 \pm 14 ^{ab}	168 \pm 13
LA (mmol \times L ⁻¹)		3.5 \pm 0.8	3.4 \pm 1.2	3.7 \pm 0.6	4.1 \pm 1.1	5.8 \pm 2.3 ^b	3.6 \pm 0.9

^a represents significant difference between the two periods

^b represents significant differences with the previous controlled cadence (from Newman-Keuls post hoc test, $p < .05$)

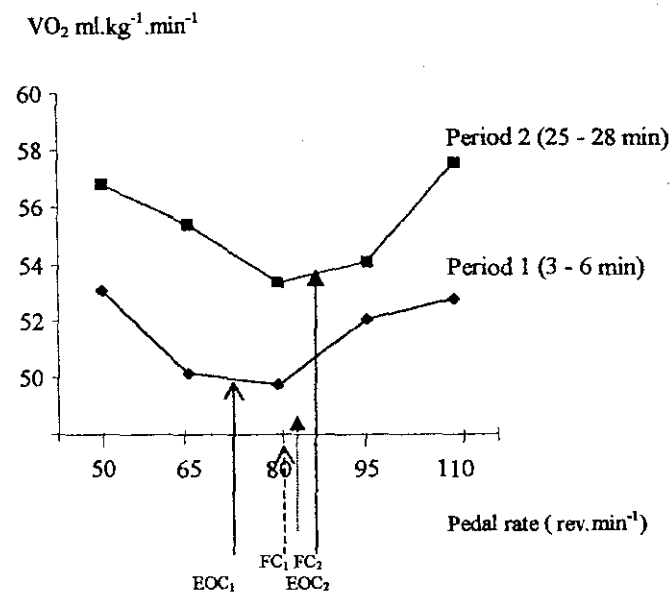


Fig. 1 Group mean responses for steady $\dot{V}O_2$ as a function of pedal rate before and after a 30 min cycling exercise.

- EOC₁: mean energetically optimal cadence during the first period,
- EOC₂: mean energetically optimal cadence during the second period,
- FC₁: mean freely-chosen cadence during the first period,
- FC₂: mean freely-chosen cadence during the second period.

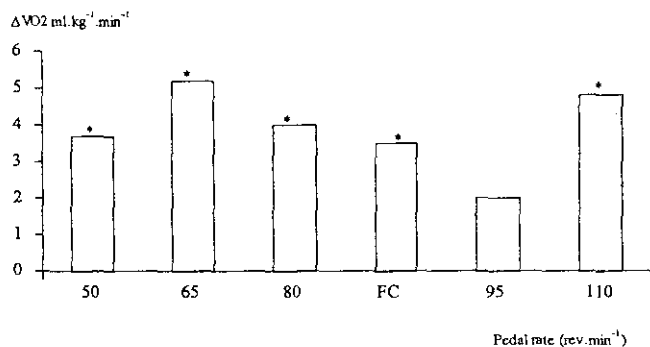


Fig. 2 Group mean responses for $\Delta\dot{V}O_2$ ($\dot{V}O_2$ period 2 - $\dot{V}O_2$ period 1) as a function of pedal rate.

* significant difference between the two periods ($p < 0.05$, FC represents the freely-chosen cadence (respective values for the first and the second period: 80 \pm 7.1 vs. 83 \pm 6.9 rpm).

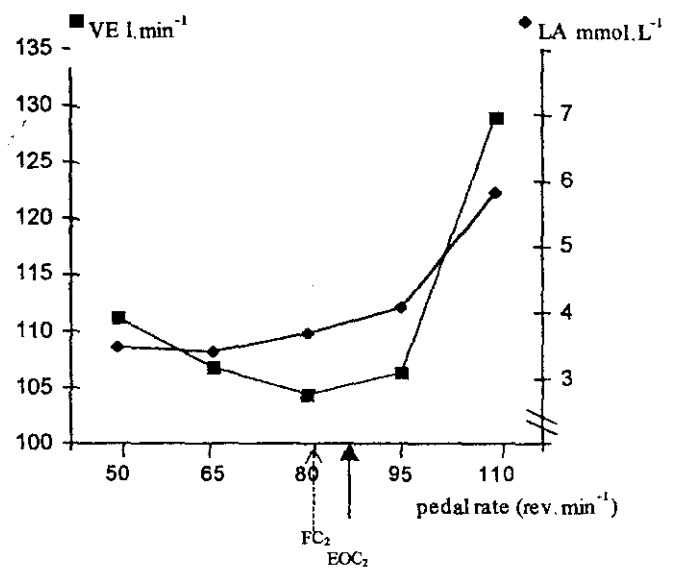


Fig. 3 Group mean responses for steady state ventilation (VE) and post exercise lactate concentration (LA) as a function of pedal rate during the second period of cycling exercise.

- EOC₂: energetically optimal cadence during the second period
- FC₂: the freely-chosen cadence during the second period.

No significant difference in freely-chosen cadence was found between the first and the second period (80 \pm 7.1 vs. 83 \pm 6.9 rpm, respectively). Moreover, only during the second period did the freely-chosen cadence not differ significantly from the energetically optimal cadence ($P > 0.05$).

Discussion

The results clearly show the existence of an energetically optimal pedalling rate for a constant power output close to competition pace in trained triathletes independent of the duration of exercise. Nevertheless, the most significant finding of this investigation was the statistically significant shift of the energetically optimal cadence over exercise duration towards a higher pedal rate which is closer to the athletes freely-chosen cadence.

However, the comparison with previous findings must take into account the possible effect of several factors. On the one

hand, the validity of the measure of energy cost of the cycling task from $\dot{V}O_2$ values and the use of heart rate as an indicator of intensity level depends on the assumption that exercise was strictly aerobic [14]. In our study carried out on triathletes, during the second period the 110 rpm pedal rate appears to be a partial anaerobic exercise. Mean blood lactate concentration and respiratory exchanges ratio values were $5.8 \text{ mmol} \times \text{L}^{-1}$ and 1.15 respectively, and for this pedal rate the above assumption appears to be violated (Table 2). On the other hand, comparison of cadence effects depends on the short term reproducibility of physiological variables between sessions. No statistical variability in physiological parameters or freely-chosen cadence was found in this study ($P > 0.05$). This result concurs with previous studies and indicates the reproducibility of energy cost measurement in trained subjects [3, 5].

To the best of our knowledge the effect of exercise of a duration longer than 6 minutes on the cycling economy cadence relation has not been well studied. Furthermore, although a lot of research has been conducted with trained cyclists, similar studies with triathletes are not available [32]. For short-term exercise the physiologically optimal cadences observed in our first period were within the range classically reported in the experimental literature for this power output in trained cyclists (e.g. [17]). For a longer period of work, since Coast et al. [11] found no difference in optimal pedal rate during a 20 min ride in five cyclists, the present results suggest that after the 20th minute a shift of this optimal rate could occur in a homogeneous group of triathletes. The differentiated effect of exercise duration on optimal cadence between cyclists and triathletes could be partly related to an individual's cycling experience also affecting the choice of a preferred cadence. In general studies have indicated that experienced cyclists use pedalling frequencies higher than 90 rpm whereas untrained cyclists prefer frequencies around 60 rpm. Cycling-experience as well as training or race specificity are thought to affect this adaptation (e.g. [10, 15, 17]). In this study the preferred pedalling rate of our triathletes at 80 rpm suggests that this choice could be influenced by the specificity of training mode in triathlon [38]. Both volume and specificity of training in cycling (triathletes vs. cyclists) appears to be a discriminant factor of a freely-chosen cadence and having an effect on the energetically optimal cadence [28]. Marsh and Martin [29] reported a training volume in cyclists of category II riding $402 \text{ km} \times \text{wk}^{-1}$ (250 miles $\times \text{wk}^{-1}$), whereas Hausswirth et al. [22] reported a training volume of $155 \text{ km} \times \text{wk}^{-1}$ (96 miles $\times \text{wk}^{-1}$) for a triathlete population specialised in Olympic distance. Moreover, in contrast to a cycle race, during the cycling section of a triathlon race the triathletes would generally try to minimise their energy demand in anticipation of the subsequent running section. This finding suggests that in trained triathletes the most economical pedalling rate could be coincident with the pedalling rate most preferred in prolonged (> 20 min) exercise of moderate-high intensity. However, further comparative studies between cyclists and triathletes are needed to test this hypothesis.

The relationship between energetically optimal and freely-chosen cadences remain unclear, and several studies have suggested that minimisation of aerobic demand is not a key determinant of preferred cadence selection [28, 29, 34, 40]. Recent studies have reported that the preferred pedalling rate of experienced cyclists was coincident with a minimisation of neu-

romuscular fatigue and not with a minimisation of aerobic demand [30, 39, 40]. At the beginning of exercise our data provide support for this hypothesis. During the first period the preferred pedal rate (80 + 7.1 rpm) was significantly higher than the energetically optimal cadence (70 + 4.5 rpm, $P < 0.05$). However, during the test no significant effect of fatigue was observed on preferred pedal rate, and a shift of the energetically optimal cadence towards the preferred pedal rate was reported. Furthermore our study found a significant effect of cadence on $\dot{V}O_2$ rise during exercise. A possible explanation for these effects could be related to a change of working muscle activity pattern with exercise duration. Several studies have also suggested the important link between a change in motor unit recruitment and the additional increase in $\dot{V}O_2$ during prolonged moderate to high intensity exercise [2, 35]. On the one hand, prolonged exercise is commonly associated with changes in EMG activity pattern and/or changes in fibre recruitment. With exercise duration the use of type I fibres is followed by recruitment of type II fibres [2, 9, 19, 20, 35]. However, type II fibre has a lower muscle efficiency (i.e. higher energy phosphate produced per oxygen molecule consumed) than type I fibre [10, 42]. Therefore the supplementation of type I by type II fibres during prolonged exercise would be related to a decrease in thermodynamical muscle efficiency leading to an increase in energy cost [42].

On the other hand, during prolonged exercise the effect of type II fibre recruitment on $\dot{V}O_2$ increase ($\Delta\dot{V}O_2$) could be enhanced by manipulation of pedal rate. Within this framework Ahlquist et al. [1] demonstrated during a 30 min ride at 85% of maximal aerobic capacity that a 50 rpm cycling rate but not a 100 rpm cadence is associated with an increase in the recruitment and glycogen depletion of type II fibres. For cycling exercise at a constant force it is suggested that a preferential recruitment of the type II fibres occurs at low pedal frequencies (< 50 rpm) and when concentration velocity is high (> 100 rpm) [36, 39]. Furthermore Takaishi et al. [40] indicated that the preferred pedalling rate of experienced cyclists (75–90 rpm) was related to a decrease in muscle stress and a preferential recruitment of type I fibres. Our results support indirectly the hypothesis of muscle fibre recruitment on $\Delta\dot{V}O_2$. In our study the lowest pre to post trial difference in $\Delta\dot{V}O_2$ was observed at 95 rpm while the highest values of $\Delta\dot{V}O_2$ were observed at 65 and 110 rpm (Fig. 2). This differential effect of pedal rate on $\Delta\dot{V}O_2$ may explain therefore the shift in energetically optimal cadence towards higher pedal rates at the end of the test.

In conclusion, during a 30 min ride performed at a habitual competition pace triathletes choose a cadence that is close to the energetically optimal cadence. Our results suggest that the change of working muscle activity pattern with exercise duration/and or pedal rate could be related firstly to the increase in $\dot{V}O_2$ with time and secondly to the shift in energetically optimal rate towards a higher cadence at the end of exercise.

References

- 1 Ahlquist LE, Bassett DR Jr, Sufit R, Nagle FJ, Thomas DP. The effect of pedalling frequency on glycogen depletion rates in type I and type II quadriceps muscle fibres during submaximal cycling exercise. *Eur J Appl Physiol* 1992; 65: 360–364

- ² Barstow TJ, Jones AM, Nguyen PH, Casabury R. Influence of muscle fiber type and pedal frequency on oxygen uptake kinetics of heavy exercise. *J Appl Physiol* 1996; 81: 1642–1650
- ³ Becque MD, Katch V, Marks C, Dyer R. Reliability and within subject variability of VE, VO₂, heart rate and blood pressure during submaximum cycle ergometry. *Int J Sport Med* 1993; 14: 220–223
- ⁴ Brisswalter J, Fougeron B, Legros P. Effect of three hours racewalk on energy cost and stride rate in elite racewalkers. *Int J Sports Med* 1996; 17: 182–186
- ⁵ Brisswalter J, Legros P. Daily stability in energy cost running, respiratory parameters and stride rate among well trained middle distance runners. *Int J Sports Med* 1994; 15: 238–241
- ⁶ Brisswalter J, Mottet D. Energy cost and stride duration at preferred transition gait speed between walking and running. *Can J Appl Physiol* 1996; 21: 471–480
- ⁷ Bruckner JC, Atchou G, Capelli C, Duvallet A, Jousselein E, Rieu M. The energy cost of running increase with distance covered. *Eur J Appl Physiol* 1990; 62: 68–72
- ⁸ Clauser F. Effect of physiological training on cardiovascular adjustments to exercise in man. *Physiol Rev* 1977; 57: 774–815
- ⁹ Citterio G, Sironi S, Piccoli S, Agostini E. Slow to fast shift in inspiratory muscle fibres during heat tachypnea. *Respir Physiol* 1983; 51: 259–274
- ¹⁰ Coast JR, Welch HG. Linear increase in optimal pedal rate with increased power output in cycle ergometry. *Eur J Appl Physiol* 1982; 53: 339–342
- ¹¹ Coast JR, Cox RH, Welch HG. Optimal pedalling rate in prolonged bouts of cycle ergometry. *Med Sci Sports Exerc* 1986; 18: 225–230
- ¹² Coyle EF, Sdossis LS, Horowitz JF, Beltz JD. Cycling efficiency is related to percentage of type I muscle fibres. *Med Sci Sports Exerc* 1992; 24: 782–788
- ¹³ Dengel DR, Flynn MG, Costill DL. Determinants of success during triathlon competition. *Res Q Exerc Sport* 1989; 60: 234–238
- ¹⁴ Di Prampero PE. The energy cost of human locomotion on land and in water. *Int J Sports Med* 1986; 7: 55–72
- ¹⁵ Faria JE. Energy expenditure, aerodynamics and medical problems in cycling. *Sports Med* 1992; 14: 43–63
- ¹⁶ Gaesser GA, Brooks GA. Muscular efficiency during steady state exercise: effect of speed and work rate. *J Appl Physiol* 1975; 38: 1132–1139
- ¹⁷ Gregor RJ, Broker JP, Ryan MM. The biomechanics of cycling. *Exercise and Science Review* 1991; 9: 127–168
- ¹⁸ Guezennec CY, Bigard AX, Vallier JM, Durey A. The energy cost of running increase at the end of a triathlon. *Eur J Appl Physiol* 1996; 73: 440–445
- ¹⁹ Gollnick PD, Piehl K, Saltin B. Selective glycogen depletion pattern in human muscle fibres after exercise of varying intensity and at varying pedal rates. *J Physiol* 1974; 214: 45–57
- ²⁰ Hagan RD, Weiss SE, Raven PB. Effect of pedal rate on cardiorespiratory responses during continuous exercise. *Med Sci Sports Exerc* 1992; 24: 1088–1095
- ²¹ Hausswirth C, Bigard AX, Berthelot M, Thomaidis M, Guezennec CY. Variability in energy cost of running at the end of a triathlon and a marathon. *Int J Sports Med* 1996; 17: 574–581
- ²² Hausswirth C, Bigard AX, Guezennec CY. Relationships between running mechanics and running efficiency at the end of a triathlon and a marathon. *Int J Sport Med* 1997; 18: 1–10
- ²³ Heglund NC, Taylor CR. Speed, stride frequency and energy cost per stride: how do they change with body size and gait? *J Exp Biology* 1988; 138: 301–318
- ²⁴ Holt KG, Hamill J, Andres RO. Predicting the minimal energy cost of human walking. *Med Sci Sports Exerc* 1991; 25: 491–498
- ²⁵ Kelso JAS, Scholtz JP, Schöner G. Dynamics governs switching among pattern of coordination in biological movement. *Physical Letters A* 1988; 134: 8–12
- ²⁶ Kreider RB, Boone T, Thompson WR, Burke S, Cortes CW. Cardiovascular and thermal responses of triathlon performance. *Med Sci Sports Exerc* 1988; 20: 385–390
- ²⁷ Laurensen NM, Fulcher KY, Korkia P. Physiological characteristics of elite and club level female triathletes during running. *Int J Sports Med* 1993; 14: 455–459
- ²⁸ Marsh AP, Martin PE. Effect of cycling exercise, aerobic power, power output on preferred and most economical cycling cadences. *Med Sci Sports Exerc* 1997; 29: 1225–1232
- ²⁹ Marsh AP, Martin PE. The association between cycling experience and preferred and most economical cadences. *Med Sci Sports Exerc* 1993; 25: 1269–1274
- ³⁰ Neptune RR, Hull ML. A theoretical analysis of preferred pedalling rate selection in endurance cycling. *J Biomech* 1999; 32: 409–415
- ³¹ Newell KM, Kugler PN, Emmerick R, Mc Donald PV. Search strategies in the acquisition of coordination. In: Wallace SA (ed). *Perspectives on the coordination of movement*. Amsterdam, North Holland: 1989: 85–122
- ³² O'Toole ML, Douglas PS. Applied Physiology of Triathlon. *Sports Med* 1995; 19: 251–267
- ³³ O'Toole ML, Douglas PS, Hiller WDB. Lactate, oxygen uptake and cycling performance in triathletes. *Int J Sports Med* 1989; 10: 413–418
- ³⁴ Patterson RP, Moreno MI. Bicycle pedalling forces as a function of pedalling rate and power output. *Med Sci Sports Exerc* 1990; 22: 512–516
- ³⁵ Poole DC, Richardson RS. Determinants of oxygen uptake: implications for exercise testing. *Sports Med* 1997; 24: 308–320
- ³⁶ Sargeant AJ. 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: 10–20
- ³⁷ Sleivert GG, Rowlands S. Physical and physiological factors associated with success in the triathlon. *Sports Med* 1996; 1: 8–18
- ³⁸ Tanaka H. Effects of cross-training: transfer to training effects on VO₂max between cycling, running and swimming. *Sports Med* 1994; 18: 330–339
- ³⁹ Takaishi T, Yasuda TY, Ono T, Moritani T. Optimal pedalling rate estimated from neuromuscular fatigue for cyclists. *Med Sci Sports Exerc* 1996; 28: 1492–1497
- ⁴⁰ Takaishi T, Yamamoto TY, Ono T, Ito T, Moritani T. Neuromuscular, metabolic and kinetic adaptations for skilled pedalling performance in cyclists. *Med Sci Sports Exerc* 1998; 30: 442–449
- ⁴¹ Williams KR. The relationship between mechanical and physiological energy estimates. *Med Sci Sports Exerc* 1985; 17: 317–325
- ⁴² Woledge RC. Possible effects of fatigue on muscle efficiency. *Acta Physiol Scand* 1998; 162: 267–273

Corresponding Author:

Pr J. Brisswalter

Université Ergonomie Sportive et Performance
 Université de Toulon-Var
 Avenue de l'Université
 BP 132
 F-83957 La Garde cedex
 France

Phone: +33 (494)14 26 13

Fax: +33 (494)14 22 78

E-mail: brisswalter@univ-tln.fr



4th Annual Congress of the European College of Sport Science

Hosted by
ISEF / IUSM
Rome University Institute
of Motor Sciences

Second Announcement
and
Call for Abstracts



PRESENTING AUTHOR
First name _____ Surname COMMUNICATION
Address _____
Please add a fast communication address: Fax/e-mail _____

Abstract Form

EFFECT OF EXERCISE DURATION ON OPTIMAL PEDALLING RATE IN WELL TRAINED TRIATHLETES

J. Brisswalter¹, C. Hausswirth²

¹Department of Applied Physiology and Health factors, LAPMH, University of Poitiers ; ²Department of Sports Sciences, INSEP, Paris.

A classical approach of locomotion is based on the notion that biological system coordinate in such ways give the ultimate performance at least cost (e.g. Wilkie, 1977). However in this approach the nature of cost must be identified. It is therefore unlikely that metabolic cost is always the criterion of minimum effort. Within this framework observations of expert cyclists often reveal a significant difference between their preferred most economical cadences (e.g., Gregor et al., 1991). Several assumptions have been made to explain apparent conflict such as changes in pedalling forces, neuromuscular activation. In fact, optimisation principles governing locomotion for cycling are probably as numerous as for other forms of locomotion, thus the adoption of a specific locomotor pattern could be seen as a function of (a) the task constraints and the constraints of the performer (Holt et al., 1996). Therefore, the purpose of this study was to examine whether the specific physiological changes observed with exercise duration during prolonged endurance cycling exercise could be related in a homogeneous group of triathletes to: a specific relation between optimal and freely-chosen cadence.

Ten well-motivated subjects selected on the basis of their performance over the "Olympic distance triathlon" participated in this study. Each subject completed 2 testing cycling track sessions in a two weeks period. During both tests, respiratory gas exchanges were collected using the Cosmed K4 telemetric system previously validated (Hausswirth et al., 1997). The first session was to determine VO_{2max} and HR_{max} . The second session was conducted at 75% HR_{max} . It was composed of five submaximal treadmill rides (lasting 5 minutes) corresponding at five cadences presented in a random order (65, 80, 95, 110rpm and freely chosen cadence (FCC)), before and after a one hour cycling track ride. During the submaximal rides respiratory exchanges, heart rate cadence and speed were continuously collected and energy cost of locomotion calculated. Furthermore during this test EMG signal of the vastus lateralis muscle was recorded. Results indicate a slight shift in energetically optimal cadence with exercise duration from an optimal zone (80rpm) to an optimal point (80rpm). This result confirms a precedent study conducted at 80% VO_{2max} during a 30 min ride (Brisswalter et al., 1999). No effect of duration was found for iEMG values. Despite a no significant decrease at the end of the test, no significant effect of duration was found on freely chosen cadence (FCC). During first period FCC1 (90 ± 10 rpm) was chosen from iEMG optimum of the vastus lateralis muscle whereas during the second period FCC2 (82 ± 8 rpm) was chosen only from energy cost optimum (Table 1). These results suggest that in our study the change of working muscle activity pattern could be related firstly to the increase in VO_2 with time for all pedal rates and secondly to the shift in energetically optimal rate towards higher pedal rate at the end of exercise. In this study the preferred cadence represents the most economical choice adopted during a one hour ride performed at an usual training pace for triathletes.

Table 1 : Mean oxygen uptake (VO_2) and iEMG values of the vastus lateralis muscle associated with the 4 controlled and the freely chosen cadence (FCC) in cycling.

		65	80	95	110	FCC
VO_2 ($ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$)	Period 1	53.4±6.4	52.3±7	54.7±4.2	59.1±4.9	54.04±7.5
	Period 2	57.9±8.5	55.7±7.44	59.3±7.1	64.1±7.02	58.6±8.6
iEMG (A.U.)	Period 1	36.2±3.8	29.1±3.1	26.0±2.4	33.1±3.4	25.5±2.1
	Period 2	38.2±4.0	28.5±2.7	26.2±3.4	32.2±3.1	26.9±2.1

REFERENCES

Wilkie JT (1977) : Int J Neuroscience. 7, 125-143.
Gregor G.J, Broker JP, Ryan MM : Exercise and Science Review., 9 : 127-168, 1991.
Holt KG, Jeng SF, Ratcliffe R, Hamill J (1996) J.Mot Behav. 27, 164-178.
Hausswirth C, Bigard AX, Lechevalier JM (1997) Int J Sports Med. 18, 449-453.
Brisswalter J., Hausswirth C, Vallier JM, Smith, D, Vercruyssen F, Goubault C. Int J Sports Med. In press

- PRESENTATION TYPE
 Oral Poster
- TARGET SESSION CODE(S)
OR SUBJECT AREA _____
- TECHNICAL REQUIREMENTS
 Overhead projector
 Slide projector
 Other _____
- APPLICATION
 Young Investigators Award
 Financial support
Applicant's age _____
country _____
- ENCLOSURES:
 One-page CV
 Endorsement letter
- Mail a clean, unfolded original, with three copies of a floppy disk (in Word or Rich Text Format) in a protected envelope to:
ESS Congress
ISEF/IUSM
P. Lauro de Bosis, 15
Via Italico
00194 Rome, Italy
within 31 March 1999.
Notice on acceptance and payment will be sent in reply to presenting authors who have registered and submitted the abstract as

Résumé

En triathlon comme dans la plupart des activités longue durée, l'un des principaux déterminants de la performance est la capacité du sujet à dépenser le moins d'énergie possible pour une quantité d'énergie produite équivalente. Cette capacité peut être identifiée à partir du calcul du coût énergétique (CE) de la locomotion humaine. De plus, la modification de la fréquence gestuelle est considérée comme le principal moyen d'optimiser le CE des trois modes de locomotion propres au Triathlon. Dans ce cadre, la détermination d'optimas en cyclisme peut être envisagée en fonction de la manipulation de la cadence de pédalage. Au cours du triathlon, la relation entre la cadence et le CE semble être liée d'une part au niveau de l'expertise dans la tâche de cyclisme et d'autre part, à la durée globale de l'exercice réalisé.

Ainsi, nous avons étudié au travers de deux études (laboratoire + terrain) les critères de choix de la cadence de pédalage chez des triathlètes (niveau régional et/ou national) au cours d'une épreuve de longue durée en cyclisme (> 1h, 75% de Fréquence cardiaque maximale) à partir de l'évaluation de la dépense énergétique et de la cinétique de la lactatémie.

Les résultats principaux indiquent clairement l'absence d'une relation quadratique entre la cadence de pédalage et le CE en début d'exercice et ne permettent pas de conclure à un effet de la durée d'exercice sur le déplacement de l'optimum énergétique. Cependant, les résultats ne montrent pas d'effet de la durée sur l'optimum neuromusculaire (cadence/EMGi) au cours de l'exercice. Cela indique que le vastus latéralis (muscle vaste externe) n'est peut-être pas révélateur de la fatigue périphérique chez ces triathlètes en cyclisme. Enfin, au début de l'exercice la fréquence de pédalage librement choisie (FLC) se rapproche de l'optimum neuromusculaire alors qu'en fin d'exercice, la FLC se décale vers l'optimum énergétique. Dans ce cadre, la stratégie utilisée par ces triathlètes en début d'exercice est orientée vers une minimisation de la fatigue neuromusculaire alors qu'en fin d'épreuve, la stratégie serait davantage associée à un principe de minimisation de la dépense en énergie. Cette relation pourrait faire l'objet d'une validation lors de l'enchaînement natation-cyclisme chez le triathlète de haut-niveau de pratique.

Mots clés : Triathlon – Fatigue périphérique – Coût énergétique – Cadences - Lactatémies