

INFLUENCE DE LA FREQUENCE DE PEDALAGE SUR LA COURSE A PIED POUR LES TRIATHLETES

*Vercruyssen F, Brisswalter J, Hauswirth C, Bernard T, Bernard O, Vallier JM
Med Sci. Sports Exer., Vol 34, N°3, pp 530-536, 2002*

Résumé

L'objet de cette étude est de mesurer l'influence des différentes fréquences de pédalages sur les paramètres métaboliques et "kinematic" durant la course à pied.

Méthodes : 8 triathlètes ont réalisé des tests (vélo et course) pour déterminer VO₂max, et les valeurs du seuil ventilatoire (SV), 2 tests vélo déterminent la cadence énergétiquement optimale (CEO).

3 tests enchaînements vélo – Course (CR – 30' vélo + 15' course) et un de 45' de course seule (CS). CEO, CR et CS sont réalisés à une intensité correspondant à SV + 5%. Durant les vélos de CR, les sujets doivent maintenir une des 3 cadences correspondants à CEO ($72,5 \pm 4,6$ rpm), la cadence librement choisie (CLC $81,2 \pm 7,2$ rpm) et de la cadence mécanique théorique optimale (CMO 90 rpm, Neptune et Hull 1999).

Résultats VO₂ augmentent durant les 30' de vélo seulement lors de CMO (+12%) et CLC (+10,4%).

Durant la course à pied de CR, VO₂, débit ventilatoire et la fréquence de la foulée sont significativement plus hautes durant CS (respectivement +11,7%, 15,7% et 7,2%)

Plus encore, un effet significatif de la cadence de pédalage a été trouvé avec la variabilité de VO₂ durant les 15' de course post vélo seulement pour CO (+4,1% et CLC + 3,6%

Conclusion les hautes cadences de pédalage (CMO, et CLC) contribuent à une augmentation du coût énergétique durant le vélo et l'apparition du composant lent de VO₂ durant la course post vélo alors que le vélo (CEO) mène à une stabilité du coût énergétique de locomotion avec la durée de l'exercice. Plusieurs hypothèses sont proposées pour expliquer les résultats comme le changement de type de fibres recrutées ou des modifications hémodynamique durant un exercice prolongé.

Dans les sports multi-activités de longues distances comme le triathlon, chaque athlète réalise la natation, le vélo et la course à pied en minimisant la dépense énergétique pour maintenir une haute vitesse moyenne durant toute l'épreuve, c'est le déterminant principal d'une performance réussie (3,22,28).

Pourtant, plusieurs études faites sur des triathlètes indiquent une augmentation du coût énergétique en course à pied (Cr) défini comme le montant d'énergie dépensé par unité de distance (3,12) comparé avec une course contrôle (11-13). Dans ce cas, les effets de la durée de l'exercice (11) ou du vélo et course à pied enchaîné (12-13) sont souvent analysés pour expliquer l'augmentation de VO₂ observé à la fin du triathlon.

A l'intérieur de cette structure, l'augmentation du coût énergétique avec la durée de l'exercice est principalement expliqué par le changement de thermorégulation, recrutement des fibres et de la mobilisation des lipides (11) et plusieurs physiologiques et biomécaniques comme le seuil ventilatoire (13) et les variations kinematic de course à pied (12) ont été donné comme hypothèse affectant la course à pied après vélo.

Ainsi, dans une perspective d'optimisation de la performance, un des facteurs déterminant apparaît être la possibilité pour un triathlète de réduire cette altération du coût énergétique durant la compétition.

Classiquement, l'adoption d'une fréquence particulière en vélo ou en course à pied est suggérée pour minimiser le coût énergétique de cette tâche (3,4,19). Pourtant la relation entre la fréquence et l'énergie dépensée est différente suivant les activités (4,19). Durant la course à pied, l'athlète adopte spontanément le patrone de

locomotion (longueur de foulée – fréquence) correspondant au plus faible coût énergétique (4). Par contre, le libre choix de la cadence énergétiquement optimale durant le vélo n'est pas observé (19) Plusieurs études ont démontré que la cadence de pédalage la plus économique pour des personnes entraînées ou pas varie de 50 à 60 rpm (19), alors que naturellement les cyclistes choisissent une cadence entre 80 et 90 rpm (27). Le choix de cette cadence particulière est en relation avec plusieurs critères comme celui de la fatigue neuromusculaire minimale (27), une réduction de la force appliquée sur les manivelles, ou de minimisation de la pression extrême (23). Dans cette étude, Neptune et Hull (21) ont calculé dans une approche théorique que les valeurs minimales de la moyenne individuelle de l'activation du muscle, et la quantité de charge s'opèrent à une cadence de 90 rpm durant le vélo submaximal à état stable. Avec la reconnaissance du triathlon, ces observations soulèvent 2 questions :

- une concernant les effets de la cadence sur la variabilité du coût énergétique du vélo durant un exercice prolongé (>20')
- et l'autre concernant l'influence de ce choix sur la performance de la course à pied après vélo.

Quelques auteurs ont étudié les effets du choix de la cadence sur les adaptations cyclistes durant un exercice prolongé chez les cyclistes (5) ou les triathlètes (3). Trop de résultats d'études restent inconsistante, indiquant aucun effet de la cadence de pédalage sur le métabolisme après 20' d'exercice (5) ou un effet significatif du choix de la cadence sur l'économie cycliste avec un changement de la cadence librement choisie vers la cadence la plus économique à la fin de 30' d'exercice (3). Pour le meilleur de notre connaissance aucune information valable concernant les effets de la cadence particulière choisie durant 30' d'exercice prolongé sur les adaptations physiologiques et biomécaniques durant la course à pied après vélo.

Donc, le but de cette expérience est :

- 1) rechercher les effets de 3 cadences de pédalages sur le coût énergétique du cyclisme après un exercice d'une durée de 30'.
- 2) Etudier l'influence de ces cadences de pédalages sur le coût énergétique de la course à pied après vélo

MATERIEL ET MEHODES

Sujets les sujets sont 8 triathlètes masculins bien entraînés et motivés (âge 24 ± 3 ans, poids $71,1 \pm 6,5$ kg, taille $180,6 \pm 8,1$ cm) qui participent à des compétitions de niveau inter-régionale.

La moyenne de l'expérience en compétition de triathlon est de $4,5 \pm 1,5$ ans et tous les sujets sont membres de l'équipe universitaire de triathlon.

Avant leur participation à cette étude, les athlètes étaient informées au sujet des modalités du protocole et donnaient leur consentement avant le début des tests, accord du comité d'éthique local concernant les lignes directrices.

Chaque athlète réalise 7 tests séparés par une période d'au moins 48 h. De plus, les sujets devaient s'abstenir d'un entraînement intensif 24 h avant le test. Durant ces tests, la température (20° C) était contrôlée dans le laboratoire.

Le 1^{er} et le 2^{ème} tests consistent en 2 tests incrémentés de détermination de VO₂max (en vélo et en course).

Le 3^{ème} test servait à déterminer la cadence énergétiquement optimale (EOC) durant le test de vélo (Cteoc ; 3).

Les autres tests sont présentés dans un ordre aléatoire, 3 tests vélo-course (C-R) et une course à pied isolée (IR).

Ergomètres

Toutes les expériences de cyclisme ont été réalisées sur un ergocycle ergomètre (SRM Jülich, Welldorf, Germany) sur lequel le guidon et la selle étaient ajustables verticalement et horizontalement reproduisant les conditions connus par les sujets sur leur propre vélo. De plus, cet ergomètre est équipé des pédales individuelles et de cales pour leurs chaussures vélos. Le système SRM permet aux athlètes de maintenir une puissance constante, indépendamment de la cadence de pédalage.

En plus, un retour d'information concernant la puissance, la fréquence cardiaque, la vitesse et la cadence sont continuellement disponibles sur écran de contrôle. La puissance appliquée sur le SRM était calculée à partir de l'équation suivante :

$$\text{Puissance (W)} = \text{Torque (Nm)} \times \text{angle de vitesse (rad.s}^{-1}\text{)}$$

De plus, tous les tests de course à pied sont réalisés sur un tapis de course contrôlé par des cellules photoélectriques durant tous les tests.

Détermination de VO₂max et des seuils ventilatoires

Les sujets réalisent 2 tests incrémentés, dans un ordre aléatoire, un sur ergocycle et l'autre sur un tapis avec une pente de 0%.

Ces tests sont réalisés jusqu'à épuisement volontaire permettant de déterminer les paliers de valeurs de VO₂max et des seuils ventilatoires (29).

Les tests sont conduits de façon à épuiser les sujets entre 8' et 12'.

Pour le test sur tapis, la vitesse de course débute à 7 km/h et est incrémentée de 1 km/h toutes les minutes.

Pour le test vélo, après 6' d'échauffement à 100 watts, la puissance est augmentée de 30 watts toutes les minutes.

Durant ces tests, la consommation d'Oxygène (VO₂), le débit ventilatoire (VE) et le ratio d'échange respiratoire (RER) sont recueillis en continu cycle par cycle par système automatique (Brainware Metasys, La Valette France) et la fréquence cardiaque (HR) est enregistrée avec un Polar (Xtrainer +, Polar Vantage, Kempele Finland).

Les critères pour déterminer l'atteinte de VO₂max sont, un plateau de VO₂ en dépit de l'augmentation de la puissance ou de la vitesse de course et RER supérieur à 1,1 et la fréquence cardiaque supérieure à 90% de la FC théorique.

La moyenne de VO₂max est obtenue avec les 3 plus hautes valeurs de VO₂max enregistrées. Les seuils ventilatoires sont déterminés durant le test vélo (VTCycle) et les tests de course à pied (VTRun) utilisant les critères d'augmentation VE/VO₂ avec une augmentation concomitante de VE/VCO₂ (29)

Détermination de la cadence énergétique optimale durant le vélo

La cadence la plus économique (CEC) est estimée avec le système SRM durant le test submaximale, l'intensité correspond à VTCycle + 5% (73,4 ± 3,5% VO₂max cycle). L'intensité des exercices ont été choisies pour être comparable aux recherches précédentes analysant la simulation d'enchaînement vélo-course à pied pour des triathlètes bien entraînés (12, 13, 22).

En plus, ces intensités sont estimées être celles correspondants aux allures de compétition durant le vélo d'un triathlon olympique. Selon les études précédentes (3,28) ce protocole composé de 6 passages submaximale (4'd'exercice, 4' de récupération) correspondant aux 6 cadences de pédalage présentées aléatoirement (50, 65, 80, 85, 95, 110 rpm et la cadence librement choisie).

Pas d'information donnée aux sujets concernant CLC durant le passage. La CLC est enregistrée durant les 2 dernières minutes toutes les 10 secondes, la moyenne est calculée.

Durant ce test (CTeoc) les valeurs de VO₂, VE, et RER sont continuellement analysées de la 2^{ème} à la 4^{ème} minutes de chaque passage.

Basée sur des études précédentes (3,19) la relation entre VO₂ et la cadence de pédalage de chaque sujet s'accorde avec une régression « polynomial » avec un modèle du second degré. Le point bas de la courbe en U représente la cadence énergétiquement optimale.

Course isolée et vélo – course enchaîné

Durant les 4 autres tests, chaque sujet réalise dans un ordre aléatoire, une course isolée de 45' sur le tapis à une vitesse correspondant à VTRun + 5% (15,7 ± 0,7km et 73,6 ± 3,6% de VO₂max run) et 3 tests vélo – course enchaîné (CR, 30' vélo + 15' Course) à une intensité correspondant respectivement pour le vélo et la course à VT + 5%. Durant le vélo de CR (272,1 ± 17,9 w et 73,4 ± 3,5% de VO₂max cycle) les sujets doivent maintenir durant 30' une des 3 cadences de pédalages correspondant à la cadence énergétiquement optimale (CEO) calculé durant le 3^{ème} test, la cadence librement choisie (CLC) et la cadence théorique mécanique optimale (CMO) estimée par Neptune et Hull (21) à 90 rpm.

Après la période de transition, les sujets courent 15'. Le temps de la transition vélo – course est standardisé à 3', ce qui permet de mettre en place les appareils de mesure. Le temps entre les 2 événement est légèrement plus grand à celui habituellement enregistré sur les triathlons (de 30'' à 1' ; 13,22) et peut avoir une influence sur les effets observés durant la transition et la course.

Pour respecter la chronologie de l'expérience, les sujets sont stoppés après 30' de course dans la course à pied isolée, durant le temps de transition de CR, et ils réalisent après les 15 dernières minutes.

Les paramètres physiologiques mesurés

Les données physiologiques (VO₂, VE, RER) sont enregistrées et analysées durant les intervalles suivants : entre la 3^{ème} et 5^{ème} minute du vélo, entre la 28^{ème} et 30^{ème} minute du vélo, entre la 33^{ème} et 35^{ème} minute de la course, entre la 38^{ème} et 40^{ème} minute de la course et entre la 43^{ème} et 45^{ème} minute de la course. De plus, le coût en O₂ de la ventilation (VRMO₂, en mlO₂. min) est calculé à partir du travail respiratoire (WB, kg.m.min, ou m représente mètre/minute) utilisant l'équation proposée par Coast et al (6) :

$$WB = -0,251 + 0,0382 VE + 0,00176 VE^2$$

$$VRMO_2 = 34,9 + 7,45 WB$$

Les paramètres biomécaniques mesurés

Pour toutes les conditions expérimentales, un détecteur de pression est fixé sur la chaussure droite du coureur afin de déterminer la période entre 2 contacts au sol pour un même pied. Grâce à ce signal, la durée de la foulée est enregistrée en continue et le paterne caractéristique de la foulée (fréquence de la foulée, SR et

variabilité de la foulée) sont calculées durant les 5 premières minutes et durant les 5 dernières de chaque test de course.

Analyse statistique

Toutes les données sont exprimées selon les standards \pm (SD). La variation du patrone de locomotion durant la course à pied est décrit en utilisant le coefficient de variation (SD/mean x 100) pour chaque athlète (3). Deux fois le projet d'analyse de la variance (2x3) pour répéter les mesures est exécuter, pour analyser les effets de la période et de la fréquence de pédalage utilisant les valeurs de VO₂, VE, RER, SR et SV de variables dépendantes. Pour cette étude, la variabilité de la foulée (%) est analysée après une transformation « arcisme ».

Le test de Newman-Keuls post hoc est utilisé pour déterminer les différences entre toutes les cadences de pédalage et la durée de la période de l'exercice.

Une paire de t-test est utilisé pour analyser :

- la différence de valeurs entre VO₂max, Vemax entre les 2 tests incrémentés
- les variations entre EOC et CLC durant Cteoc. 0,05 est retenu comme niveau de signification pour toutes les statistiques de la recherche.

RESULTATS

Tests maximal

La moyenne des données pour les paramètres maximaux enregistrés durant les 2 tests incrémentés est présenté dans le tableau 1

Table 1 Caractères physiologiques des sujets durant les tests incrémentés

Paramètres	Test de Course	Test Vélo
VO ₂ max (ml.min ⁻¹ .kg ⁻¹)	69 \pm 3,2	68,7 \pm 3,2
Vemax (l.min ⁻¹)	188,7 \pm 7,3	184,8 \pm 11,9
Hrmax (beats.min ⁻¹)	190,1 \pm 5,7	186,4 \pm 6,9
VT (% de VO ₂ max)	70,1 \pm 3,4	69,9 \pm 3,3

Pas de différence significative (P>0,05) trouvée concernant VO₂max, Vemax et VO₂ des valeurs VT enregistrées durant les tests incrémentés de vélo et de course. Ces résultats indiquent une homogénéité des aptitudes aérobies de tous les triathlètes quelque soit le mode de locomotion.

Détermination de la cadence énergétiquement optimale

La 2^{ème} tendance pour la description de la relation entre VO₂ et la cadence a été trouvé pour tous les sujets, et la valeur moyenne du coefficient de régression est R = 0,80 \pm 0,2. Le déterminant mathématique de la moyenne EOC (point bas) a été identifié à 72,3 \pm 5 rpm (allant de 63,5 à 78,1 rpm). La différence significative a été identifié entre EOC et CLC durant Cteoc (72,3 \pm 5 vs 81,9 \pm 11,7 rpm, P <0,05)

Tests vélo de CR

Paramètres biomécanique

Les valeurs moyennes des cadences de pédalages enregistrées durant les 30' d'exercice sont respectivement pour CMO, CLC et CEO 90,2 \pm 0,8, 81,2 \pm 7,2 et 72,5 \pm 4,6 rpm. L'analyse statistiques indique une différence significative entre les valeurs moyennes pour les 3 cadences de pédalages (P<0,05) Pas de différence

significative pour CLC, trouvé durant les 30' de vélo (respectivement de la 3^{ème} à la 5^{ème} minute et de la 28^{ème} à la 30^{ème} minute $81,1 \pm 7,5$ vs $81,3 \pm 7$ rpm, $P > 0,05$). Pour finir, aucune différence significative entre CLC et CEO n'est observée entre le 3^{ème} test (Cteoc) et CR ($P > 0,05$)

Paramètres physiologiques

Le tableau 2 montre l'évolution des paramètres physiologiques durant le protocole. Un effet significatif de la durée de l'exercice est observée avec ΔVO_2 durant les 30 premières minutes ($VO_2[28-30] - VO_2[3-5]$, $P < 0,05$) seulement durant les tests CMO et CLC (+12,0% et 10,4% respectivement), alors qu'il n'y a pas de différence significative trouvée pour ΔVO_2 à CEO ($P > 0,05$). Durant les 30 minutes de vélo, les valeurs de VO_2 enregistrées durant CEO sont significativement plus basses que celles enregistrées dans d'autres conditions ($P < 0,05$). De plus, une augmentation significative de ΔVE durant les 30 minutes ($VE[28-30] - VE[3-5]$) a été identifiée seulement durant CMO (+26,1%, $P < 0,05$). Dans cette recherche, le coût ventilatoire ($VRMO_2$, en $MLO_2 \cdot \text{min}^{-1}$) augmente significativement entre les intervalles 3^{ème} à 5^{ème} minutes et de la 28^{ème} à la 30^{ème} minutes (+48,7%) représentant une augmentation de 26,8% de VO_2 .

Tableau 2 : Moyenne de VO_2 , Fréquence ventilatoire VE, ratio d'échange respiratoire RER durant les 3 tests vélo-course enchaînés (MOCrun, FCCrun, EOCrun) et course à pied isolé (IR) aux différents intervalles de temps 0-5min, 28-30min, 33-35min, 38-40min, et 43-45min

Conditions expérimentales		Paramètres physiologiques		
Tests	Intervalles de Mesures	VO_2 $\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$	VE $\text{l} \cdot \text{min}^{-1}$	RER
Vélo MOC	3 – 5 min	$52,3 \pm 5,6$	$113,0 \pm 10,6$	$1,02 \pm 0,07$
	28-30	$58,6 \pm 6,5$ ad	$142,5 \pm 10,7$ a	$1,01 \pm 0,04$
	33-35	$56,6 \pm 5,2$ bd	$135,7 \pm 10,5$ b	$0,99 \pm 0,04$
	38-40	$57,8 \pm 4,6$ bd	$139,0 \pm 9,8$ b	$1,00 \pm 0,04$
	43-45	$58,9 \pm 5,1$ bcd	$142,1 \pm 12,2$ b	$1,00 \pm 0,04$
Vélo CLC	3 – 5	$51,6 \pm 4,8$	$109,3 \pm 16,0$	$1,02 \pm 0,06$
	28-30	$57,0 \pm 3,4$ ad	$122,5 \pm 12,4$	$0,99 \pm 0,04$
	33-35	$56,9 \pm 4,7$ b	$132,1 \pm 17,9$ b	$0,99 \pm 0,06$
	38-40	$58,7 \pm 3,8$ bd	$135,1 \pm 21,1$ b	$0,99 \pm 0,05$
	43-45	$59,0 \pm 4,8$ bcd	$135,4 \pm 19,0$ b	$0,99 \pm 0,06$
Vélo CEO	3 – 5	$50,6 \pm 4,5$	$110,2 \pm 10,0$	$1,02 \pm 0,09$
	28-30	$53,3 \pm 5,2$	$118,6 \pm 15,1$	$0,99 \pm 0,05$
	33-35	$54,4 \pm 5,1$ b	$131,3 \pm 15,8$ b	$0,99 \pm 0,05$
	38-40	$55,9 \pm 4,4$ b	$134,0 \pm 12,7$ b	$1,00 \pm 0,03$
	43-45	$55,7 \pm 3,9$ b	$136,6 \pm 16,6$ b	$1,01 \pm 0,06$
Course seule	3-5	$50,7 \pm 3,6$	$110,5 \pm 18,1$	$1,00 \pm 0,05$
	33-45	$51,0 \pm 2,7$	$117,2 \pm 17,7$	$0,99 \pm 0,05$

Enchaînements vélo – course à pied

Paramètres biomécaniques

Les résultats sont présentés dans le tableau 3. Quelque soit la cadence de pédalage, la fréquence de la foulée enregistrée durant la course après le vélo est

significativement plus élevée que durant la course à pied seule (+7,2%). Pas de différence significative sur la variation de la foulée quelque soit la condition ($P > 0,05$).

Paramètres Physiologiques

En accord avec les résultats précédents (12) pas de différence significative dans les moyennes de VO_2 et VE sont observées durant la course à pied seule. Inversement un effet significatif suite au vélo fait antérieurement à la course est observé sur les valeurs de VO_2 durant la course ($P < 0,05$, tableau 2).

En comparaison avec la course isolée, VO_2 et les données ventilatoires sont significativement plus hautes quel que soit la cadence de pédalage ($VO_2 +11,7\%$ et $VE +15,7\%$, $P < 0,05$). Le coût ventilatoire ($VRMO_2$ en $MLO_2 \cdot \text{min}^{-1}$) augmentant significativement durant la course à pied de CR en comparaison avec IR (+39,6%) et représentant une augmentation de VO_2 de 26,6%.

De plus, une augmentation significative de ΔVO_2 durant les 15' de course après le vélo ($VO_2[43-45] - VO_2[33-35]$) a été identifié après CMO et CLC (respectivement +4,1% et 3,6%). En contraste, pas d'augmentation ΔVO_2 n'est observée durant CEO et les valeurs de VO_2 enregistrées dans ces conditions sont significativement plus basses que celles obtenues dans les autres conditions ($P < 0,05$).

DISCUSSION

La principale conclusion de cette étude est l'effet significatif du choix de la cadence de pédalage sur les variations de consommation d'oxygène dans un exercice de vélo et durant une course à pied après vélo.

De plus, nos résultats confirment l'altération significative du coût énergétique de la course à pied (CR) après du vélo comparativement à la course isolée.

Economie cycliste et durée de l'exercice.

La présente étude montre une baisse de l'économie de vélo (CE, ie, VO_2 durant le vélo à allure submaximale) après 30' d'exercice réalisé à la cadence mécanique théorique optimale (CMO, 90 rpm, 21) et la cadence librement choisie (CLC $81,2 \pm 7,2$ rpm).

En revanche, pas de variation significative de CE n'est observée pour la cadence énergétiquement optimale (CEO $72,5 \pm 4,6$ rpm) avec la durée de l'exercice.

Pour le meilleur de notre connaissance, peu d'informations sont disponibles concernant les effets du choix de la cadence de CE durant un exercice prolongé (3,5). Dans la 1^{ère} étude, Coast et al (5) n'ont rapporté aucun effet du choix de la cadence (40 – 120 rpm) sur le CE durant 20' d'exercice à 85% de VO_{2max} (approximativement 300 w)

Pourtant Brisswalter et al (3) rapportent un effet de la cadence cycliste (50 – 110 rpm) sur le CE durant 30' de vélo réalisé à 80% de la puissance maximale ($291,0 \pm 25$ w) avec 10 triathlètes.

Nos valeurs enregistrées pour la puissance correspondante à 272, $1 \pm 17,9$ w sont en accord avec les prévisions de l'étude et indique un effet significatif du choix de la cadence de pédalage sur la variabilité de VO_2 durant un test de vélo de 30'.

Durant un exercice d'intensité modéré à haute, un des facteurs souvent utilisé pour expliquer l'évolution de VO_2 avec la durée de l'exercice et les différences de cadences de pédalages est le changement de recrutement des fibres musculaires (3,24).

Tableau 3 Caractéristiques des foulées durant les 15' de course après le vélo (MOC run, FCC run, EOC run) et la course à pied isolée(IR) dans 2 intervalles (0 à 5 min et 10 à 15 min)

Conditions expérimentales		Paramètres biomécaniques	
Tests	intervalles	fréquence de la foulée	variabilité de la foulée
MOC run	0 – 5	1.44 ± 0.06a	7.96 ± 2.83
	10-15	1.42 ± 0.06a	8.38 ± 2.22
FCC run	0 – 5	1.41 ± 0.02a	11.49 ± 4.65
	10-15	1.40 ± 0.04a	11.02 ± 3.56
EOC run	0 – 5	1.44 ± 0.05a	8.83 ± 3.46
	10-15	1.40 ± 0.06a	9.30 ± 2.25
Course seule	0 – 5	1.31 ± 0.03	11.42 ± 3.73
	10-15	1.33 ± 0.05	11.86 ± 3.89

a significativement différent entre la course isolée à la même période (P<0.05)
Les valeurs sont exprimées en moyenne ±

Dans ce cadre, Woledge (30) a suggéré que le remplacement des muscles de type I par ceux de type II durant un exercice prolongé doit être lié à la baisse de l'efficacité thermodynamique du muscle menant à une augmentation du coût énergétique. Ainsi dans cette étude, la 1^{ère} hypothèse peut être rattaché à l'augmentation de ΔVO_2 à haute cadence de pédalages (> 80 rpm) durant les 30 premières minutes de vélo, avec un recrutement additionnel de fibres musculaires de type II, lequel à une plus faible efficacité musculaire (ie, haute énergie phosphate produite par molécule d'O₂ consommé) que les fibres de type I (30).

Au contraire, pas de variation d'économie en vélo n'est observé après 30' d'exercice à cadence de pédalage à économie optimale, servant de support pour l'hypothèse que l'adaptation de cette cadence (CEO) par les sujets est liée à une participation plus importante de fibres de type I. Néanmoins, la relation entre la cadence de pédalage et le recrutement des fibres musculaires (basé sur iEMG) dans l'économie en cyclisme n'est pas clairement identifiée. Donc, il serait intéressant que d'autres études analyse simultanément la variabilité de l'économie en vélo et l'évolution de l'activité musculaire en vélo à différentes cadences (comprise entre 50 et 110 rpm) durant un exercice prolongé.

Dans cette étude, les triathlètes ont spontanément choisi une cadence de pédalage (81 rpm) significativement plus haute que CEO (73 rpm). Le choix de cette haute cadence de pédalage induit une augmentation de la consommation d'oxygène classiquement relaté lors d'une augmentation du travail intrinsèque pour un mouvement répétitif des membres (8,26) et/ou pour une augmentation du coût ventilatoire (6).

D'une part Francescato et al (8) ont indiqué que la fraction de la consommation d'ensemble de VO₂ due au travail intrinsèque pour un sujet pédalant à 100w et à 60 rpm est d'environ 0,2 pendant la fraction utilisée est d'environ 0,6 à 100 rpm.

D'autre part, pour les valeurs moyenne du groupe, nos résultats montrent une augmentation significative de VE seulement à la fin de COM. Basée sur l'équation proposée par Coast et al (6), le coût ventilatoire estimé dans l'augmentation du

travail respiratoire (WB) peut expliquer approximativement 26,8% de l'augmentation de VO₂ avec la durée de l'exercice.

Nos données confirment les premiers résultats indiquant que la baisse de la sollicitation aérobie n'est pas une clef déterminante du choix de la cadence de pédalage des sujets entraînés (3, 19, 26,27). Pour les exercices cyclistes de courtes durées, un conflit apparent est systématiquement observé entre la CEO et la CLC pour les cyclistes expérimentés, les coureurs entraînés (19,27) ou les triathlètes (3).

Plusieurs hypothèses sont avancées pour expliquer l'adoption de haute cadence de pédalage.

D'une part, il est rapporté que la force maximale sur les pédales est atteinte à des cadences minimum comprise entre 90 et 100 rpm (23) suggérant que l'habileté de pédalage réduit la force sur les pédales à haute cadence de pédalage (26).

Dans ses travaux, Takaishi et al (27) supposent que la raison pour laquelle les cyclistes adoptent une haute cadence de pédalage est relativement liée à la réduction de la fatigue neuromusculaire dans les muscles travaillant (ie, valeurs minimales des muscles iEMG) plutôt que l'économie (ie, moins de dépenses énergétiques pour un exercice de pédalage).

D'autre part, Marsh et Martin (19) ont suggéré que le niveau de travail aérobie peut devenir important à la cadence préférée parce que un coureur entraîné mais sans expérience cycliste mais avec un passé d'entraînement en endurance, choisit une haute cadence de pédalage comparativement à un cycliste expérimenté.

Pourtant, pour un exercice de vélo long (> à 30 minute), cette contradiction entre CEO et CLC n'est pas systématiquement observée chez les triathlètes (17, 28)

Des études récentes ont indiqué une réduction de CLC vers une cadence plus économique après 1h et 2h d'exercice vélo à puissance constante (17, 28). Plus encore, les études multi-disciplinaires semblent montrer nécessaire l'étude des facteurs qui permettent de choisir une cadence spécialement durant un effort prolongé.

Exercice cycliste et coût énergétique de la course après

Suivant les précédents résultats (11-13) le coût énergétique de la course (Cr, ie, Vo₂ durant une course submaximale à intensité donnée) est significativement plus haut après le vélo quand on le compare à la course isolée (+11,7%). Les valeurs relatives moyennes de VO₂ pour IR et Cr vont respectivement de 74,5 à 83% de VO₂max

Les résultats enregistrés après 45' d'exercice peuvent être reliés à ce que rapportent d'autres auteurs, comparant l'une ou l'autre course d'un triathlon ou une simulation vélo – C_{àp} enchaîné en laboratoire avec une course isolée (respectivement IR vs CR, 73 et 77 vs 78 à 83% de VO₂max) (11-13)

Dans cette étude, la différence dans la combinaison fréquence et amplitude de la foulée est souvent suggérée pour expliquer une substantielle portion de la variation du Cr (4).

Dans notre étude, l'augmentation de 7,2% de la fréquence de la foulée peut être liée à l'augmentation du travail mécanique et donc à l'augmentation du CE de C_{àp}. Ce

résultat est en accord avec les précédentes études qui ont montré, avec l'apparition de la fatigue, une augmentation significative de la fréquence et une baisse de la longueur de la foulée tout en maintenant une vitesse constante (7) Cela peut être suggérer dans notre étude quand les sujets réalisent le vélo juste avant la C \grave{a} p, le processus de fatigue dans la musculature des membres inférieurs est importante et peut expliquer, en partie, la différence du CE entre la Cisolée et la C \grave{a} p après vélo.

Cadence de pédalage choisie et variabilité du coût énergétique en C \grave{a} p

Une des plus intéressantes conclusions de cette étude est l'observation d'une augmentation continue de VO $_2$ durant les 15' de C \grave{a} p après les hautes cadences de pédalages (COM, CLC). Pour un exercice de moins de 15', l'augmentation continue de VO $_2$, au delà de 3' d'exercice (ie, retardant l'état stable) a été nommé la composante lente de l'augmentation d'oxygène (VO $_2$ sc) (1,2,14,24)

En accord, avec les précédentes études, le travail de la vitesse lors d'un exercice associé avec l'arrivée de VO $_2$ sc au dessus du seuil lactique et ventilatoire (ie, exercice dur) (2,14,24). Le principe posé est que les mécanismes responsables de cette VO $_2$ Sc inclue l'élévation de la de la température du muscle. Le travail des muscles ventilatoires et cardiaques, la cinétique du lactate, des catécholamines et le recrutement moins efficient des fibres musculaires de type II (24).

Dans notre étude, une explication possible pour l'apparition de VO $_2$ sc durant la course à pied après vélo (MOC course et FCC course) peut être la différence dans le niveau métabolique d'exercice enregistré à la fin des tests de MOC et FCC.

La 1^{ère} hypothèse peut être liée aux précédentes études (1,25,27) qui suggèrent qu'une relation existe entre l'apparition de VO $_2$ sc et l'emploi progressivement plus grand des muscles rapide durant 15' de course après vélo réalisé à haute intensité.

Classiquement, il est reporté que l'augmentation progressive dans un exercice intensif peut être penser par un recrutement plus large de fibre de type II (24, 25,27) Dans notre étude, le travail intensif à la fin du vélo provoque une variation de 78 \grave{u} de VO $_2$ max pour EOC run session à 84-85% VO $_2$ max pour MOC run et FCC run session. Ainsi nous suggérons que plus de fibre de type II sont recrutées quand on commence une C \grave{a} p après FCC et MOC. Inversement, nos résultats montrent un faible coût énergétique durant 30' de vélo et les 15' de course suivante quand les sujets adoptent la cadence énergiquement optimale à puissance identique. Parce que à faible intensité métabolique (ie 78 \grave{u} VO $_2$ max après l'exercice de vélo) nous supposons que l'adoption de EOC induit un faible proportion de fibre de type II durant les 30' d'exercice. Cette hypothèse peut expliquer pour une part, la réduction dans VO $_2$ sc qui apparaît durant la course après vélo et en accord avec les résultats de Barstow et al (1) qui ont rapporté une corrélation entre la réduction de VO $_2$ sc et le pourcentage de fibre de type I dans le vasque latérale.

Néanmoins, cette relation entre VO $_2$ sc et la nature du recrutement des fibres n'est pas systématiquement valide.

Récemment, Lucia et al (18) ont reporté que l'apparition de VO $_2$ sc sans aucun dans les données EMG (rms EMG et la fréquence de puissance moyenne) enregistrée durant 20' d'exercice à haute puissance chez les cyclistes professionnels

De plus, de nombreuses études précédentes ont investigué le mécanisme sous jacent de VO $_2$ sc durant une course à pied isolée (2) ou d'un exercice de vélo (1) indiquant une augmentation de VO $_2$ sc en vélo quand on compare avec C \grave{a} p (14)

Sans cette recherche, pour le meilleur de notre connaissance aucune information valable concernant le VO₂sc durant la C p après vélo.

Durant la dernière décade, plusieurs auteurs ont analysé les effets antérieurs de la base ou haute intensité sur VO₂sc en vélo sur un exercice cycliste suivant à haute intensité (9,16). Ces auteurs ont montré une réduction significative de VO₂sc (entre la 3^{ème} et le 6^{ème} minute) après un exercice antérieur à haute intensité. Gerbino et al (9) ont suggéré que cette réduction de VO₂sc durant le 2^{ème} exercice de vélo peut être expliqué par une modification hémodynamique conduisant à une amélioration du travail musculaire.

En accord avec cette hypothèse, une explication de nos résultats peut être la différence entre le travail musculaire entre une C p après vélo ou une C p isolée. Pour l'instant, Matsui et al (20) ont mesuré la circulation sanguine musculaire après un exercice classique en vélo et ils rapportent que la circulation sanguine dans la cuisse après un exercice vélo est significativement plus élevée que dans le mollet. En plus, les auteurs ne rapportent pas de différence significative dans la circulation entre la cuisse et le mollet pour un exercice routinier de C p. De plus durant le vélo Gotshall et al (10) ont suggéré une amélioration de la circulation sanguine avec une augmentation de la cadence de pédalage (de 50 à 110 rpm) durant 5' d'exercice vélo. Cette amélioration de la circulation durant le travail musculaire pour des hautes cadences est expliquée par une augmentation du flux sanguin musculaire et une baisse de la résistance vasculaire. Donc basé sur ces résultats précédents nous supposons que durant le vélo, l'activation musculaire (ie vasque latérale et médian) (26,27), la meilleure perfusion musculaire avec une augmentation de la cadence de pédalage (10).   l'inverse, les muscles utilisés en C p (ie muscles du mollet) deviennent relativement moins perfusés que les cuisses durant le vélo. Après durant la C p, cette baisse prévisible dans le muscle actif du mollet devient active, comptant pour la haute VO₂sc durant la C p après le vélo. Les futures recherches doivent nécessairement valider ces précédentes hypothèses du fait de l'inconsistance des résultats.

En conclusion, les résultats de cette étude indiquent que les hautes cadences de pédalages (MOC, FCC) contribuent à l'apparition de la composante lente de VO₂ durant la C p après vélo.

Pourtant, le choix de la cadence énergétiquement optimale montre une réduction du coût énergétique de locomotion durant le vélo et la C p après. Ainsi, nous suggérons que le vélo fait à la cadence énergétiquement optimale est bénéfique en terme de VO₂ après 30' et peut devenir une stratégie d'anticipation pour une performance en C p.

Dans le contexte des activités multisport comme le tri ou le duathlon, davantage d'investigation est nécessaire pour identifier les mécanismes métaboliques et neuromusculaires sous-jacents à la relation entre la cadence de pédalage antérieure et la variabilité du coût énergétique en C p suivante. Aussi, il manque le besoin pour les futures bases d'évaluation de la performance.

Aussi, il manque pour les besoins futurs des bases d'évaluation de la performance des différentes stratégies de course en vélo.

Bibliographie

- 1 Influence of muscle fiber type and pedal frequency on oxygen uptake kinetics of heavy exercise Barstow TJ, Jones AM, J. Appl. Physiol 81:1642-1650; 1996
- 2 Influence of the oxygen uptake slow component on the aerobic energy cost of high-intensity submaximal treadmill running in humans Bernard O, Maddio F, OUATTARA S, et al Eur J Appl Physiol, 78:578-585, 1998
- 3 Energetically optimal cadence vs freely-chosen cadence during cycling : Effect of exercise duration BRISSWALTER J. HAUSSWIRTH C; & al Int. J. Sports Med. 21: 60-64
- 4 The effect of stride length variation on oxygen uptake during distance running Cavanagh P Williams R & KR Med. Sci. Sports Exerc. 14:30-35, 1982
- 5 Optimal pedalling rate in prolonged bouts of cycle ergometry COAST JR, COX H, WELCH HG Med. Sci. Sports Exerc. 18:225-230
- 6 Ventilatory work and oxygen consumption during exercise and hyperventilation Coast JR, Rasmussen SA, Krause KM, O'Kroy JA Loy RA & Rhodes J J. Appl. Physiol 74:793-798, 1993
- 7 Biomechanical evaluation of the role of fatigue in middle-distance running Elliot B, Roberts C & AD, Can. J. Appl Sports Sci. 5:203-207, 1980
- 8 oxygen cost of internal work during cycling Francescato M, Girardis M et Di Prampero PE Eur. J. Appl. Physiol. 72:51-57, 1995
- 9 Effects of prior exercise on pulmonary gas-exchange kinetics during high-intensity exercise in humans Gerbino A, WARD SA, Whipp BJ J. Appl. Physiol. 80:99-107, 1996
- 10 Cycling cadence alters exercise hemodynamics Gotshall RW, Bauer TA et Fahmer SL Int. J. Sports Med. 17:17-21, 1996
- 11 Increase in energy cost of running at the end of a triathlon Guezennec CY, Vallier JM, Bigard AX, Durey A Eur. J. Appl. Physiol. 73:440-445
- 12 Relationships between running mechanics and energy cost of running at the end of a triathlon and a marathon HAUSSWIRTH C. BIGARD A.X. & al Int. J. Sports Med 18 330-339
- 13 The influence of prior cycling on biomechanical and cardiorespiratory response profiles during running in triathletes Hue O, Le Gallais D, Chollet D, Boussana A, Préfaut C Eur J Appm Physiol 77:98-105, 1998
- 14 Effect of exercise modality on oxygen uptake kinetics heavy exercise Jones AM, et McConnell AM Eur. J. Appl. Physiol. 80:213-219, 1999
- 15 the dynamic calibration of bicycle power measuring cranks Haake SJ, The Engineering of sports 1998 265-274
- 16 In human the oxygen uptake is reduced by prior exercise of high as well as low intensity Koppo K et Bouckaert J Eur. J. Appl Physiol. 83:559-56, 2000
- 17 Evidence of neuromuscular fatigue after prolonged cycling exercise LEPERS R. HAUSSWIRTH C. & al Medecine & science in sports & exercise 32:1880-1886, 2000
- 18 The slow component of VO₂ in professional cyclists Lucia A, Hoyos J et Chicharro JL Br. J. Sports Med 34:365-374, 2000
- 19 Effect of cycling experience, aerobic power and power output on preferred and most economical cycling cadences Marsh AP & Martin PE Med. Sci. Sports Exerc. 29:1225-1232, 1997
- 20 Oxygen uptake and blood flow of the lower limb in maximal treadmill and bicycle exercise Matsui H, Kitamura K at Miyamura Eur. J. Appl. Physiol. 40:57-62, 1978M
- 21 A theoretical analysis of preferred pedaling rate selection in endurance cycling Neptune R & Hull ML J. Biomech. 32:409-415, 1999
- 22 Applied physiology of a triathlon. O'Toole ML, Douglas PS, Sports Med. 19:251-267, 1995