

Effet de 4 semaines d'entraînement sur le temps limite à VO₂max

Richard Heubert¹, Valéry Bocquet¹, Jean Pierre Koralsztein¹, et Véronique Billat^{1,2}

Catalogue Data

Heubert, R.; Bocquet, V.; Koralsztein, J-P.; et Billat, V. (2003). Effet de 4 semaines d'entraînement sur le temps limite à VO₂max. **Can. J. Applied Physiol.** 28(5): 705-724. © 2003 Société Canadienne de Physiologie de l'Exercice.

Mots clés: temps pour atteindre VO₂max, performance, cinétique d'oxygène, chute de VO₂
Key words: time limit at VO₂max, time to reach VO₂max, performance, oxygen kinetics

Résumé/Abstract

L'objectif de cette étude était d'étudier l'effet de huit séances d'entraînement en course à pied sur le temps limite à VO₂max (tlim VO₂max). Huit sportifs ont réalisé, avant et après un entraînement sollicitant VO₂max, un test triangulaire et cinq temps limite à 90, 95, 100, et 115% vVO₂max, et à la vitesse critique à VO₂max (CV'; pente de la relation linéaire entre le tlim VO₂max et la distance limite parcourue à VO₂max). L'entraînement n'a eu aucun effet significatif sur le VO₂max ($p = 0,17$) et sur le tlim VO₂max ($p = 0,72$). On observe cependant un décalage de la courbe "tlim VO₂max-vitesse" vers la droite signifiant que pour solliciter le même tlim VO₂max après entraînement, l'athlète doit courir à une intensité supérieure. Le tlim VO₂max à CV', avant entraînement, est significativement supérieur aux tlim VO₂max à 90, 95, 100, et 115% vVO₂max ($p < 0,05$). CV' augmente significativement, après entraînement, en valeur absolue ($13,9 \pm 1,3$ vs. $14,9 \pm 1,2$ km·h⁻¹, $p < 0,05$; $n = 6$) mais pas en valeur relative à vVO₂max (86 ± 4 vs. $86 \pm 5\%$ vVO₂max; $p = 0,9$). Ainsi, huit séances d'entraînement sollicitant VO₂max n'augmentent pas significativement le temps limite à VO₂max. Par ailleurs, CV' est la vitesse qui permet de maintenir le sujet le plus longtemps à VO₂max durant un exercice continu à vitesse constante mais CV', exprimée en pourcentage de vVO₂max, n'augmente pas avec l'entraînement.

¹Centre de Médecine du Sport, Caisse Centrale des Activités Sociales, 2 Avenue Richerand, 75010 Paris, France; ²Laboratoire des interactions gènes et entraînement, Université d'Evry Val-d'Essonne, Bd F. Mitterrand, 91025 Evry, France.

The purpose of this study was to examine the effect of 4 weeks training in running on the time spent at VO₂max (tlim VO₂max). Eight athletes carried out, before and after an aerobic training, an incremental and five exhaustive tests at 90, 95, 100, and 115% vVO₂max and at the critical power at VO₂max (CV'; slope of the linear relation between the tlim VO₂max and the distance limit at VO₂max). This training did not significantly improve VO₂max (p = 0.17) or tlim VO₂max (p = 0.72). However, the "tlim VO₂max-intensity" curve was shifted toward the right, meaning that the athlete had to run at a higher intensity after training to obtain the same tlim VO₂max. Tlim VO₂max at CV' before training was significantly higher than tlim VO₂max at 90, 95, 100, and 115% vVO₂max (p < 0.05). This training increased CV' in absolute value (13.9 ± 1.3 vs. 14.9 ± 1.2 km·h⁻¹, p < 0.05; n = 6) but not in relative value (86 ± 4 vs. 86 ± 5% vVO₂max; p = 0.9). In conclusion, in spite of the shift of the "tlim VO₂max-intensity" curve, tlim VO₂max was not significantly increased by this training. Furthermore, CV' allowed subjects to spend the longest time of exercise at VO₂max during a continuous exercise with constant speed, but CV', expressed in % vVO₂max, did not improve with this training.

Introduction

La "composante lente" de la cinétique de la consommation d'oxygène (VO₂) apparaît pour des exercices d'intensité "sévère," c'est à dire, comprise entre la vitesse critique (CV) et la vitesse en course à pied (vVO₂max) associée à la consommation maximale d'oxygène (VO₂max) (Gaesser et Poole, 1996). Cette vitesse critique correspond à la pente de la relation linéaire entre le temps limite (tlim) et la distance limite parcourue (dlim). Elle peut être maintenue en course à pied entre 20 et 40 minutes. Cette composante lente, qui retarde l'atteinte d'un état stable de VO₂, permet d'atteindre VO₂max pour des vitesses inférieures à vVO₂max (Gaesser et Poole, 1996). Ainsi les vitesses comprises entre 90 et 140% vVO₂max permettent au sportif d'atteindre VO₂max lors d'exercice continu d'intensité constante (Astrand et Rodahl, 1986; Billat et al., 2000a; Hill et al., 1997).

Cependant la vitesse qui permettrait de maintenir VO₂max le plus long temps possible se situerait au alentour de 90% vVO₂max pour Hill et al. (1997) et serait proche de 100% vVO₂max pour Billat et al. (1999, 2000a). Ces intensités ont été déterminées à l'aide de différentes épreuves à vitesse constante, soutenues jusqu'à épuisement, en traçant la relation entre l'intensité relative (% vVO₂max) et le temps passé à VO₂max (tlim VO₂max). Ce temps limite à VO₂max dépend de la durée du temps d'épuisement du sujet (temps limite = tlim) et du temps pour atteindre VO₂max (TA VO₂max), deux paramètres qui diminuent avec l'augmentation de l'intensité d'exercice (tlim VO₂max = tlim - TA VO₂max; Billat et al., 2000a). Ces relations "tlim VO₂max-vitesse" et "tlim-vitesse" ont par ailleurs été mises en évidence par différents auteurs (Billat et al., 2000a; **Morton, 1996**).

En utilisant la méthode de détermination de la puissance critique (Ettema, 1966; Scherrer et al., 1954), Billat et al. (1999) ont développé la notion de vitesse critique à VO₂max (CV') décrivant une relation linéaire entre le temps limite à VO₂max et la distance de course parcourue à VO₂max (dlim VO₂max):

$$dlim\ VO_2max = V \times tlim\ VO_2max = CV' \times tlim\ VO_2max + a'$$

où V est la vitesse de course, CV' est la vitesse critique à VO₂max, et "a" la distance parcourue à VO₂max à l'aide de l'énergie anaérobie de réserve restante après

atteinte de $VO_2\max$. Cette dernière relation déterminerait la vitesse (CV') qui permettrait aux sportifs de soutenir $VO_2\max$ sur la plus grande durée possible. Billat et al. (1999) ont, par ailleurs, montré que CV' n'était pas significativement différente de $vVO_2\max$ dans leur étude. Ce dernier résultat pourrait être expliqué, chez des sportifs entraînés, par une diminution de l'amplitude de la composante lente avec l'entraînement (Carter et al., 2000) qui pour des vitesses inférieures à $vVO_2\max$ ne permettrait plus d'atteindre $VO_2\max$. De plus pour les intensités où la composante lente n'interviendrait pas dans l'atteinte de $VO_2\max$, le temps limite à $VO_2\max$ serait plus grand, après entraînement, en raison d'un temps limite plus long (Demarle et al., 2001). Par conséquent, la courbe "tlim $VO_2\max$ -vitesse" serait décalée vers la droite et le haut et CV' augmenterait, se rapprochant ainsi de $vVO_2\max$ (figure 1). Cependant aucune étude n'a encore testé l'effet d'un entraînement sur le temps limite à $VO_2\max$, ni même sur la vitesse qui permet d'obtenir le plus long temps limite à $VO_2\max$.

Ainsi, le but de cette expérimentation est d'étudier l'effet de 4 semaines d'entraînement, effectué à des vitesses sollicitant $VO_2\max$ (90, 95, 100, et 115% $vVO_2\max$) (Billat et al., 2000a), sur le temps limite à $VO_2\max$ lors d'épreuves effectuées à 90, 95, 100, et 115% $vVO_2\max$ et CV' . Nous émettons l'hypothèse que CV' est la vitesse qui permet d'obtenir le plus long tlim $VO_2\max$ durant un exercice continu. Ainsi les divergences de résultat sur l'intensité, exprimée en pourcentage de $vVO_2\max$, qui permet le plus long temps limite à $VO_2\max$ seraient dû au niveau d'entraînement des sujets. L'entraînement aurait pour conséquence d'augmenter l'intensité relative à laquelle on obtient le plus long temps de maintien à $VO_2\max$ (CV') (Billat et al., 1999, 2000). **2000a or 2000b?**

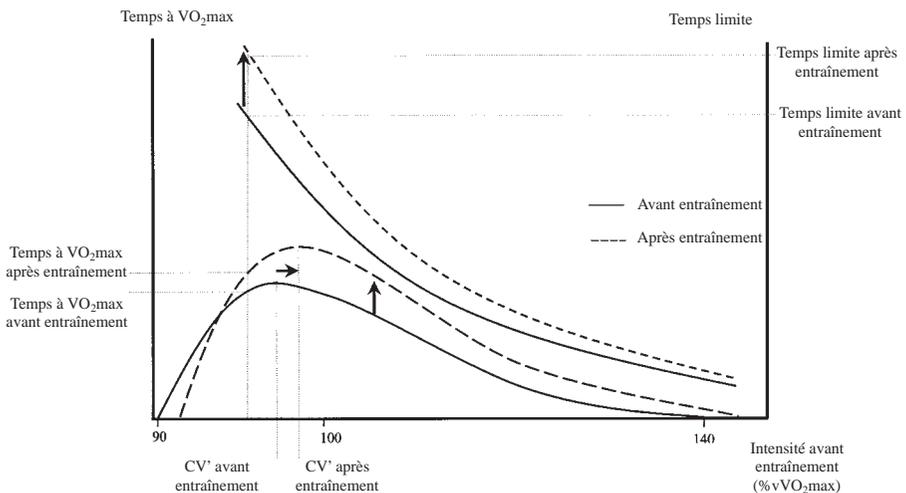


Figure 1. Hypothèses: l'entraînement augmente le temps limite/temps limite à $VO_2\max$ (flèche verticale ↑) et/ou augmente la vitesse qui sollicite le plus long temps $VO_2\max$ (flèche horizontale →).

Matériels et méthodes

SUJETS ET PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

Huit étudiants en éducation physique et sportive ont participé à cette étude. Leur âge, poids, et VO_2max moyen étaient, respectivement, de $24,5 \pm 1,7$ ans; $70,4 \pm 6,1$ kg; et $54,0 \pm 6,5$ $\text{mlO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$. Tous les sportifs et le comité d'éthique de l'hôpital Saint Louis (Paris) avaient donné leur consentement concernant les modalités de l'expérimentation.

Cette étude a été effectuée en Septembre–Octobre 2001 en trois phases: tests avant entraînement, entraînement, et tests après entraînement (tableau 1). Les tests avant et après entraînement ont été effectués à raison d'un par jour sur une piste d'athlétisme en tartan de 400 m. Durant chaque test, les sujets ont été verbalement encouragés afin qu'ils réalisent leur meilleure performance possible.

Tableau 1 Schéma expérimental et protocole d'entraînement

<u>Semaine 1</u>	<u>Sem. 2</u>	<u>Sem. 3</u>	<u>Sem. 4</u>	<u>Sem. 5</u>	<u>Semaine 6</u>
Tests avant entraînement	Entraînement (2 séances par semaine)				Tests après entraînement
1. Test incrémentiel	6 × 25% tlim100	6 × 25% tlim115	3 × 50% tlim100	3 × 50% tlim115	1. Test incrémentiel
2. tlim à: 90% $v\text{VO}_2\text{max}$					2. tlim à: 90% $v\text{VO}_2\text{max}$ avant entraînement
95% $v\text{VO}_2\text{max}$	3 × 50% tlim95	3 × 50% tlim90	2 × 75% tlim95	2 × 75% tlim90	95% $v\text{VO}_2\text{max}$ avant entraînement
100% $v\text{VO}_2\text{max}$					100% $v\text{VO}_2\text{max}$ avant entraînement
115% $v\text{VO}_2\text{max}$					115% $v\text{VO}_2\text{max}$ avant entraînement
3. tlim CV'					3. tlim CV'

Note: tlim = temps limite; CV' = puissance critique à VO_2max ; 6 × 25% de tlim100 (séance 1, semaine 2) = six répétitions de 25% du tlim 100% $v\text{VO}_2\text{max}$ couru à 100% $v\text{VO}_2\text{max}$.

Le test incrémentiel. Ce test nous a permis de déterminer VO_2max , $v\text{VO}_2\text{max}$, et la vitesse de début d'accumulation d'acide lactique dans le sang. La vitesse initiale était de $11 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ et était augmentée de $1 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ toutes les 3 minutes, et ceci jusqu'à épuisement. Les prélèvements sanguins étaient réalisés à la fin de chaque palier (au cours d'une pause de 30 sec) et 3 minutes après l'arrêt de l'exercice. Les gaz expirés étaient mesurés en cycle à cycle. VO_2max était défini comme la VO_2 la plus élevée lorsque les valeurs étaient moyennées sur 30 secondes. Les critères utilisés pour déterminer VO_2max étaient les suivants: (a) un plateau de VO_2 malgré une augmentation de la vitesse; (b) une fréquence cardiaque (FC) supérieure à 90% de la FC maximale théorique; (c) un quotient respiratoire $> 1,1$;

et (d) une concentration d'acide lactique dans le sang $> 8-9$ mM (Howley et al., 1995). La vitesse associée à VO_2max ($v\text{VO}_2\text{max}$) était définie lors du test incrémentiel comme la plus petite vitesse pour laquelle VO_2max était atteinte (Billat et Koralsztein, 1996; Demarle et al., 2001).

Si cette vitesse était maintenue moins de la moitié du palier alors $v\text{VO}_2\text{max}$ était la vitesse du palier précédent, et si elle était maintenue, la moitié du palier alors $v\text{VO}_2\text{max}$ était la vitesse intermédiaire entre ces deux paliers (palier précédent + $0,5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$) (Demarle et al., 2001; Kuipers et al., 1985). La vitesse de début d'accumulation d'acide lactique a été définie comme la vitesse correspondant au point de départ de l'accumulation du lactate sanguin entre 3,5 et 5,0 mM et exprimée en pourcentage de VO_2max (Aunola et Rusko, 1984).

Test à vitesse constante jusqu'à épuisement (tlim) à 90, 95, 100, et 115% $v\text{VO}_2\text{max}$ et à CV'. Chaque test était précédé d'un échauffement de 10 minutes réalisé à 60% $v\text{VO}_2\text{max}$ suivi d'une période de repos de 5 minutes. Durant chaque test, les sujets étaient verbalement encouragés pour maintenir la vitesse aussi longtemps que possible jusqu'à épuisement. La vitesse de course était contrôlée grâce à un système de repère audiovisuel et le sujet arrêtait l'exercice lorsqu'il n'arrivait plus à maintenir la vitesse de course. Les prélèvements sanguins ont été réalisés au repos avant le test, après l'échauffement, et 3 minutes après la fin de chaque test. La VO_2 a été moyennée toutes les 5 secondes.

ENTRAÎNEMENT

Les sujets ont réalisé un entraînement fractionné en course à pied permettant d'améliorer davantage les paramètres aérobie qu'un protocole continu (Gorostiaga et al., 1991) (tableau 1). L'entraînement, d'une durée de 4 semaines, s'est fondé sur plusieurs principes (Billat et Koralsztein, 1996; Smith et al., 1999):

- L'intensité des exercices est déterminée par rapport aux tests effectués (90, 95, 100, et 115% de $v\text{VO}_2\text{max}$). Les sujets ont donc couru sur toute la plage d'intensité qui sollicite VO_2max .
- Le temps de course est déterminé en pourcentage du temps limite afin d'être compris entre 25% (au début de l'entraînement) et 75% (à la fin de l'entraînement) du tlim. En effet, Smith et al. (1999) ont montré qu'il fallait courir durant au moins 60% du temps de course pour obtenir une augmentation significative de la performance sur 3000 m.
- Le nombre de répétitions est déterminé de façon à ce que le temps total de course soit égal à 1,5 fois le temps limite réalisé aux tests (Billat et al., 2001a; 2001b).
- La durée des récupérations entre les répétitions était égale à la moitié de la durée des répétitions pour les entraînements à 90, 95, et 100% $v\text{VO}_2\text{max}$, et à la durée des répétitions pour les entraînements à 115% de $v\text{VO}_2\text{max}$. L'intensité de cette récupération était de 50% $v\text{VO}_2\text{max}$.

Matériel. Les gaz expirés étaient analysés à l'aide d'un analyseur portatif en cycle à cycle de type K4b² (Cosmed, Rome, Italie) validé par McLaughlin et al. (2001). Cet analyseur était calibré avant chaque test à l'aide de gaz de concentration connue en O_2 et CO_2 . La calibration de la turbine était réalisée avec une seringue de 3 litres (Quinton instruments, Seattle, USA).

La concentration du lactate sanguin a été déterminée en utilisant un analyseur portable de type Docteur Lange (GmbH, Berlin, Allemagne) à l'aide de prélèvements sanguins réalisés au bout du doigt. Cet analyseur de lactate a été calibré avant les tests avec plusieurs solutions de concentrations connues.

CALCULS DES VARIABLES

Ajustement de la cinétique de VO₂. Les données ont été modélisées à l'aide du logiciel Sigmaplot (SPSS, Chicago, USA). En raison des cinétiques différentes suivant l'intensité d'exercice, nous avons utilisé deux principales fonctions: mono-exponentielle et bi-exponentielle (Barstow et Molé, 1991).

La modélisation mono-exponentielle:

$$VO_2(t) = VO_2b + A_1 \times (1 - \exp^{-(t-TD_1)/\tau_1}) \times u_1$$

où $u_1 = 0$ pour $t < TD_1$, $u_1 = 1$ pour $t \geq TD_1$; avec t , le temps en minute; $VO_2(t)$, la consommation d'oxygène au cours du temps en $ml \cdot mn^{-1}$; VO_2b , la consommation d'oxygène de base avant le début de l'exercice en $ml \cdot mn^{-1}$; A_1 , la première composante de la consommation d'oxygène durant le test en $ml \cdot mn^{-1}$; TD_1 , le temps d'apparition du début de A_1 en minute (temps compris entre le début de l'exercice et l'apparition A_1), et τ_1 , la constante de temps pour atteindre 63% de A_1 en minute.

La modélisation bi-exponentielle:

$$VO_2(t) = VO_2b + A_1 \times (1 - \exp^{-(t-TD_1)/\tau_1}) \times u_1 + A_2 \times (1 - \exp^{-(t-TD_2)/\tau_2}) \times u_2$$

où $u_1 = 0$ pour $t < TD_1$, $u_1 = 1$ pour $t \geq TD_1$, $u_2 = 0$ pour $t < TD_2$, et $u_2 = 1$ pour $t \geq TD_2$; avec A_2 , la seconde composante de la consommation d'oxygène durant le test en $ml \cdot mn^{-1}$; TD_2 , le temps d'apparition de la seconde composante (A_2) en minute, et τ_2 , la constante de temps pour atteindre 63% de A_2 en minute.

En observant certaines cinétiques, nous avons utilisé un autre modèle qui prend en compte la chute linéaire du VO_2 observée à la fin de certain test de tlim (figure 1). Ainsi cette modélisation utilise les équations de la relation mono (Eq. 1) ou bi-exponentielle (Eq. 2) dans lesquelles nous avons ajouté une régression linéaire:

$$VO_2(t) = VO_2b + A_1 \times (1 - \exp^{-(t-TD_1)/\tau_1}) \times u_1 + p_1 \times (t - TD_2) \times u_2 \quad (1)$$

$$VO_2(t) = VO_2b + A_1 \times (1 - \exp^{-(t-TD_1)/\tau_1}) \times u_1 + A_2 \times (1 - \exp^{-(t-TD_1)/\tau_2}) \times u_2 + p_1 \times (t - TD_3) \times u_3 \quad (2)$$

avec $u_2 = 0$ (Eq. 1) et $u_3 = 0$ (Eq. 2) pour $t < TD_2$ et $t < TD_3$, u_2 et $u_3 = 1$ pour $t \geq TD_2$ et TD_3 , p_1 , la pente négative de la droite, TD_2 (pour le modèle mono-exponentiel), et TD_3 (pour le modèle bi-exponentiel) le temps d'apparition de la chute linéaire de la consommation d'oxygène (Perrey et al., 2002).

Détermination du temps limite de course. Lors des différents tests à vitesse constante jusqu'à épuisement, le temps limite de course a été déterminé comme la durée comprise entre le début de l'exercice et le moment où le sujet n'arrivait plus à maintenir l'intensité cible.

Temps soutenu à VO_2max ($tlim\ VO_2max$). L'état stable du VO_2 était défini lorsque le sujet atteignait 95% de sa VO_2max incrémentielle (Billat et al., 2000a). Durant chaque test rectangulaire, le $tlim\ VO_2max$ a donc été calculé en faisant la différence entre temps total de course ($tlim$) et le temps mis pour atteindre 95% VO_2max incrémentielle ($TA\ VO_2max$) (Billat et al., 2000a) (Eq. 3). Lorsqu'en fin d'exercice la VO_2 chutait et devenait inférieure à 95% VO_2max incrémentielle (temps de chute, tc), cette composante était alors ajoutée dans l'équation (Eq. 4) (figure 2):

$$tlim\ VO_2max = tlim - TA\ VO_2max \quad (3)$$

$$\text{ou } tlim\ VO_2max = tlim - TA\ VO_2max - tc \quad (4)$$

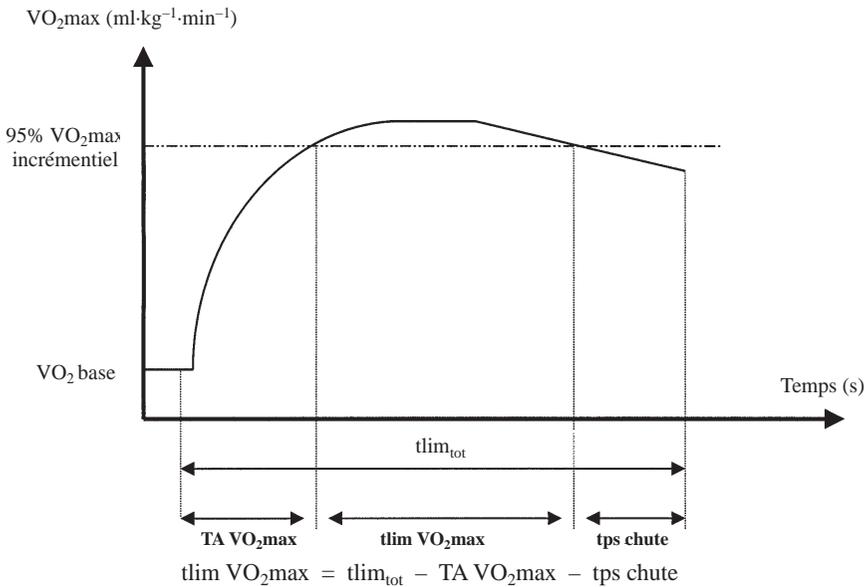


Figure 2. Temps passé à VO_2max ($tlim\ VO_2max$ = temps limite à VO_2max ; $Tlim_{tot}$ = temps limite total; $TA\ VO_2max$ = délai d'atteinte de VO_2max ; $tps\ chute$ = durée de la chute de VO_2 à la fin d'exercice).

Détermination de la vitesse critique (CV) et de la vitesse critique à VO_2max (CV'). La vitesse critique, caractérisée par la pente de la relation entre $dlim$ et $tlim$, a été obtenue à l'aide de plusieurs temps limite réalisés à différentes intensités sous maximales (Vandewalle et al., 1997). Ce choix découle de certains facteurs limitants des exercices supra-maximum: la capacité maximale anaérobie, la consommation d'oxygène, et l'inertie du métabolisme aérobie pour les exercices très brefs.

$$\text{Ainsi } dlim = V \times tlim = CV \times tlim + a$$

avec d_{lim} la distance parcourue (m), V la vitesse de course ($m \cdot s^{-1}$), t_{lim} le temps d'épuisement du sujet (s), CV la vitesse critique ($m \cdot s^{-1}$), et "a" la distance parcourue (m) utilisant les réserves en oxygène de la myoglobine et le métabolisme anaérobie (Ettema, 1966).

CV' (pente de la relation entre $t_{lim} VO_2max$ et $d_{lim} VO_2max$) a été déterminée de la même manière que CV , à l'aide des mêmes temps limite sous maximaux, mais cette fois ci à partir des distances ($d_{lim} VO_2max$) (m) et des temps de course ($t_{lim} VO_2max$) (s) effectués uniquement à VO_2max relevés durant chaque test:

$$d_{lim} VO_2max = CV' \times t_{lim} VO_2max + a'$$

avec "a'" la distance parcourue à VO_2max (m) à l'aide des réserves anaérobies restantes après l'atteinte de VO_2max .

Temps de réponse moyen (MRT). Afin de pouvoir comparer les différentes cinétiques d'oxygène caractérisées à l'aide des différents modèles, nous avons calculé le MRT qui correspond au temps pour atteindre 63% de l'amplitude entre la VO_2 de repos et l'état stable maximal de VO_2 (Linnarsson et al., 1974):

$$MRT = [A'_1 / (A'_1 + A'_2) \times (\tau_1 + TD_1)] + [A'_2 / (A'_1 + A'_2) \times (\tau_2 + TD_2)]$$

avec $A'_1 = A_1 \times [1 - \exp^{-(TD_2 - TD_1)/\tau_1}]$, $A'_2 = A_2 \times [1 - \exp^{-(t_{lim} - TD_2)/\tau_2}]$ et t_{lim} , le temps d'épuisement (s).

La composante lente de VO_2 . La valeur de la composante lente de VO_2 est associée à la valeur de A'_2 ($mlO_2 \cdot mn^{-1}$).

ANALYSES STATISTIQUES

Les données ont été analysées à l'aide d'une ANOVA à deux facteurs (intensité, entraînement) pour mesures répétées. Les tests t de Student à mesures appariées et de Wilcoxon ont été utilisés pour comparer l'évolution des paramètres avec l'entraînement. La relation entre les variables a été mesurée à l'aide d'un test Z de corrélation et de Spearman. Les tests de Spearman et de Wilcoxon ont été utilisés quand le nombre de sujet était inférieur à 7. Les résultats ont été présentés comme moyenne \pm écart type (ET). Dans toutes les analyses, le niveau de significativité a été fixé à $p < 0,05$.

Résultats

EFFET DE L'ENTRAÎNEMENT

Les paramètres obtenus lors des tests incrémentiels. L'effet de l'entraînement sur les paramètres obtenus lors des tests incrémentiels montre une amélioration significative de vVO_2max , mais pas de VO_2max (tableau 2).

Le temps limite à VO_2max . Les performances moyennes des temps limites à VO_2max durant les tests à 90, 95, 100, et 115% vVO_2max , avant et après entraînement, sont présentées dans le tableau 3.

Le temps limite à VO_2max diminue significativement avec l'augmentation de la vitesse de course ($p < 0,05$), mais aucun effet de l'entraînement n'a été observé sur ce paramètre ($p = 0,72$) (tableau 3). La courbe " $t_{lim} VO_2max$ -vitesse" est décalée vers la droite, c'est à dire que les sujets doivent courir à une vitesse supérieure après

Tableau 2 Effet de l'entraînement sur les paramètres obtenus lors des tests incrémentiels (n = 8)

	Valeurs avant entraînement	Valeurs après entraînement	p
vVO ₂ max (km·h ⁻¹)	16,1 ± 1,4	16,9 ± 1,1	p < 0,05
VO ₂ max (mlO ₂ ·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)	54,0 ± 6,5	56,7 ± 6,8	p = 0,17
Vitesse La (km·h ⁻¹)	13,0 ± 1,5	14,4 ± 1,2	p < 0,05
Vitesse La (% vVO ₂ max)	80,5 ± 3,1	85,1 ± 3,6	p < 0,05
FC max (bat·min ⁻¹)	199,1 ± 10,0	193,4 ± 7,3	p < 0,05
[La] max (mmol·L ⁻¹)	13,1 ± 2,1	11,9 ± 1,8	p < 0,05

Note: Avec Vitesse La = la vitesse de début d'accumulation d'acide lactique dans le sang.

entraînement pour obtenir le même temps à VO₂max (figure 3). Aucun effet significatif de l'intensité et de l'entraînement n'a été observé sur le temps limite à VO₂max exprimé en pourcentage du temps limite (respectivement, p = 0,09 et p = 0,66).

Les paramètres du temps limite à VO₂max. Le temps limite augmente significativement avec la diminution de la vitesse de course et l'entraînement (p < 0,05 pour les deux). La courbe "tlim-vitesse" est décalée vers la droite (figure 3). La variation du temps limite (Δ tlim; tlim après entraînement – tlim avant entraînement) à 90, 95, et 115% vVO₂max est significativement corrélés à Δ vVO₂max (respectivement, r = 0,82; r = 0,87; et r = 0,84; p < 0,05). Ainsi l'augmentation du temps limite covarie avec celle de vVO₂max.

Le temps d'atteinte du VO₂max diminue significativement avec l'augmentation de l'intensité d'exercice, mais il n'est pas modifié par l'entraînement (respectivement, p < 0,05 et p = 0,6; tableau 4). Par ailleurs, le temps de réponse moyen (MRT) est significativement plus court avec l'augmentation de l'intensité d'exercice mais aucun effet n'a été observé avec l'entraînement (p < 0,05 et p = 0,17, respectivement; tableau 4).

Des chutes de VO₂ ont été observées chez 75% des sujets aux différentes intensités conduisant à une diminution du temps limite à VO₂max. Cependant chez un même sujet, aucune chute n'a été observée lors de tests effectués au même pourcentage de vVO₂max avant et après entraînement.

La composante lente de VO₂ est significativement réduite après entraînement à 95% vVO₂max (p < 0,05), mais pas à 90% vVO₂max (p = 0,06) ni à 100% vVO₂max (p = 0,6) (tableau 4).

Concernant les autres paramètres caractéristiques de la cinétique de VO₂, seul τ_1 a été modifié par l'entraînement (p < 0,05) (tableau 4; figure 4).

La vitesse critique VO₂max. CV' est, avant et après l'entraînement, l'intensité qui permet au sujet de maintenir le plus long temps limite à VO₂max (respectivement, n = 8/8 vs. n = 6/8; tableau 5; figure 3). En effet, le temps limite à VO₂max à CV' est, avant entraînement, significativement supérieur aux tlim

Tableau 3 Tlim et tlim VO₂max obtenus durant les temps limites à vVO₂max avant entraînement

Sujets (n)	Avant entraînement				Après entraînement			
	Vitesse (km·h ⁻¹)	tlim (s)	VO ₂ max (% tlim)	[La] repos	Vitesse % vVO ₂ max	tlim (s)	VO ₂ max (% tlim)	[La] repos
Temps limite a 90% vVO₂max								
n = 7	Moy 14,5	708	67	2,73	85	923	42	2,05
	ET 1,3	211	21	1,22	4	221	38	0,87
		n = 7*				n = 5*		
n = 5#	Moy 14,9	777	62		86	932	59	
	ET 1,1	212	23		2	135	29	
Temps limite a 95% vVO₂max								
n = 8	Moy 15,3	456	57	2,22	91	695	47	1,87
	ET 1,3	97	27	0,81	4	215	32	0,39
		n = 7*				n = 7*		
n = 7#	Moy 15,6	456	54		92	652	53	
	ET 1,1	104	27		3	193	28	
Temps limite a 100% vVO₂max								
n = 8	Moy 16,1	373	55	2,16	96	419	51	2,01
	ET 1,4	111	26	1,36	4	95	19	0,86
		n = 8*				n = 8*		
Temps limite a 115% vVO₂max								
n = 8	Moy 18,5	159	39	2,53	n = 7	187	30	1,83
	ET 1,6	17	28	0,73	109	58	40	0,37
		n = 6*			5			

Note: tlim = temps limite; tlim VO₂max = temps passé à VO₂max; [La] repos = concentration de lactate dans le sang au repos en mM·L⁻¹. *Nombre de sujets ayant atteint VO₂max; #Statistiques effectués avec les sujets ayant atteint VO₂max avant et après entraînement.

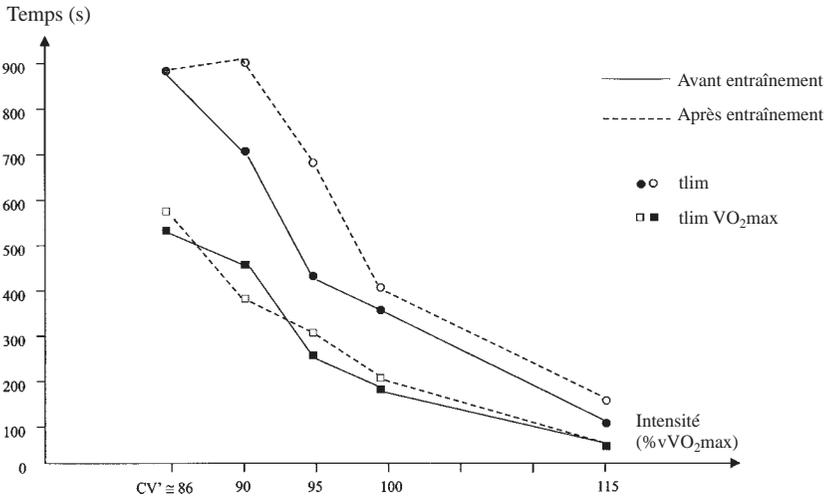


Figure 3. Tlim et tlim VO₂max, avant et après entraînement, en fonction de l'intensité d'exercice.

VO₂max à 90, 95, 100, et 115% vVO₂max. Cependant, après entraînement tlim VO₂max n'est significativement supérieur qu'au tlim VO₂max 115% vVO₂max.

Avec l'entraînement, CV', en intensité absolue, n'a pas significativement augmentée (en km·h⁻¹; $n = 8$; $p = 0,07$). Cependant si l'on considère les 6 sujets pour lesquels CV' est la vitesse qui permet, avant et après l'entraînement, le plus long tlim VO₂max, alors CV' en intensité absolue augmente significativement avec l'entraînement ($p < 0,05$). En intensité relative, CV' varie entre 81 et 90% vVO₂max et n'augmente pas significativement avec l'entraînement ($86 \pm 4\%$ vVO₂max vs. $86 \pm 5\%$ vVO₂max, $p = 0,89$). L'ordonnée à l'origine (a') et le temps limite à VO₂max à CV' ne sont pas significativement différents avant et après l'entraînement ($p = 0,60$ et $p = 0,87$, respectivement).

CV' et vVO₂max sont corrélées avant et après l'entraînement (respectivement, $r = 0,91$, $p < 0,05$; et $r = 0,86$, $p < 0,05$). Cependant la variation de vVO₂max ($\Delta vVO_{2\max}$) n'est pas significativement corrélée à celle de CV' ($r = 0,39$, $p = 0,35$).

Discussion

L'objectif de cette expérimentation était d'étudier l'effet de 4 semaines d'entraînement sur le temps limite à VO₂max. Les principaux résultats montrent que: (a) le temps limite à VO₂max n'est pas significativement augmenté par l'entraînement; (b) CV' est la vitesse qui permet le plus long temps limite à VO₂max; (c) les courbes "tlim-vitesse" et "tlim VO₂max-vitesse" sont décalées vers la droite (cela signifie que pour solliciter le même tlim/ tlim VO₂max le sujet doit courir à une intensité absolue plus élevée après entraînement; figure 3); et (d) cet entraînement augmente CV' en valeur absolue, mais pas en valeur relative, puisque vVO₂max est augmentée par l'entraînement dans les mêmes proportions que CV'.

Tableau 4 Effet de l'entraînement sur les différents paramètres de la cinétique de VO₂

VO _{2b} (mlO ₂ .mn ⁻¹)	A ₁ (mlO ₂ .mn ⁻¹)		τ ₁ (s)		A ₂ (mlO ₂ .mn ⁻¹)		τ ₂ (s)		TD ₂ (s)		P ₃		TD ₃ (s)		TA VO ₂ max (s)		MRT (s)		
	Av	Ap	Av	Ap	Av	Ap	Av	Ap	Av	Ap	Av	Ap	Av	Ap	Av	Ap	Av	Ap	
Tlim 90% vVO₂max																			
628	674	2685	2744	27	25	491	320	152	86	139	192	-0,4	-1	800	820	210	267	66	52
±108	±196	±532	±345	±11	±5	±128	±145	±75	±89	±60	±74	±0,1	±0,1	±96	±157	±123	±23	±18	±18
Tlim 95% vVO₂max																			
690	637	2715	2956	26	24	528	329	126	93	142	193	-3,7	-1,2	430	709	173	211	67	52
±134	±141	±538	±531	±11	±7	±157	±92	±52	±70	±90	±81	±1	±0,1	±5	±110	±85	±99	±14	±17
Tlim 100% vVO₂max																			
610	578	2999	2982	30	19	332	427	95	104	149	121	-2,5	-0,9	344	344	128	141	45	47
±147	±136	±445	±473	±10	±8	±72	±147	±47	±106	±26	±57	±0,9	±0,9	±3	±62	±34	±10	±10	±26
Tlim 115% vVO₂max																			
814	613	2923	3149	24	23									55	55	58	76	25	23
±248	±94	±569	±439	±10	±4									-9,1	-9,1	±19	±48	±9	±4
Effet de l'intensité																			
p = 0,58		p < 0,05		p = 0,87		p = 0,94		p = 0,1		p = 0,1								p < 0,05	
Effet de l'entraînement																			
p = 0,21		p = 0,44		p < 0,05		p = 0,16		p = 0,2		p = 0,7								p = 0,6	

Note: Avec Tlim = le temps limite; VO_{2b} = la VO₂ de repos; Av = avant entraînement; Ap = après entraînement; P₃ = la pente de la chute linéaire de VO₂ en fin d'exercice.

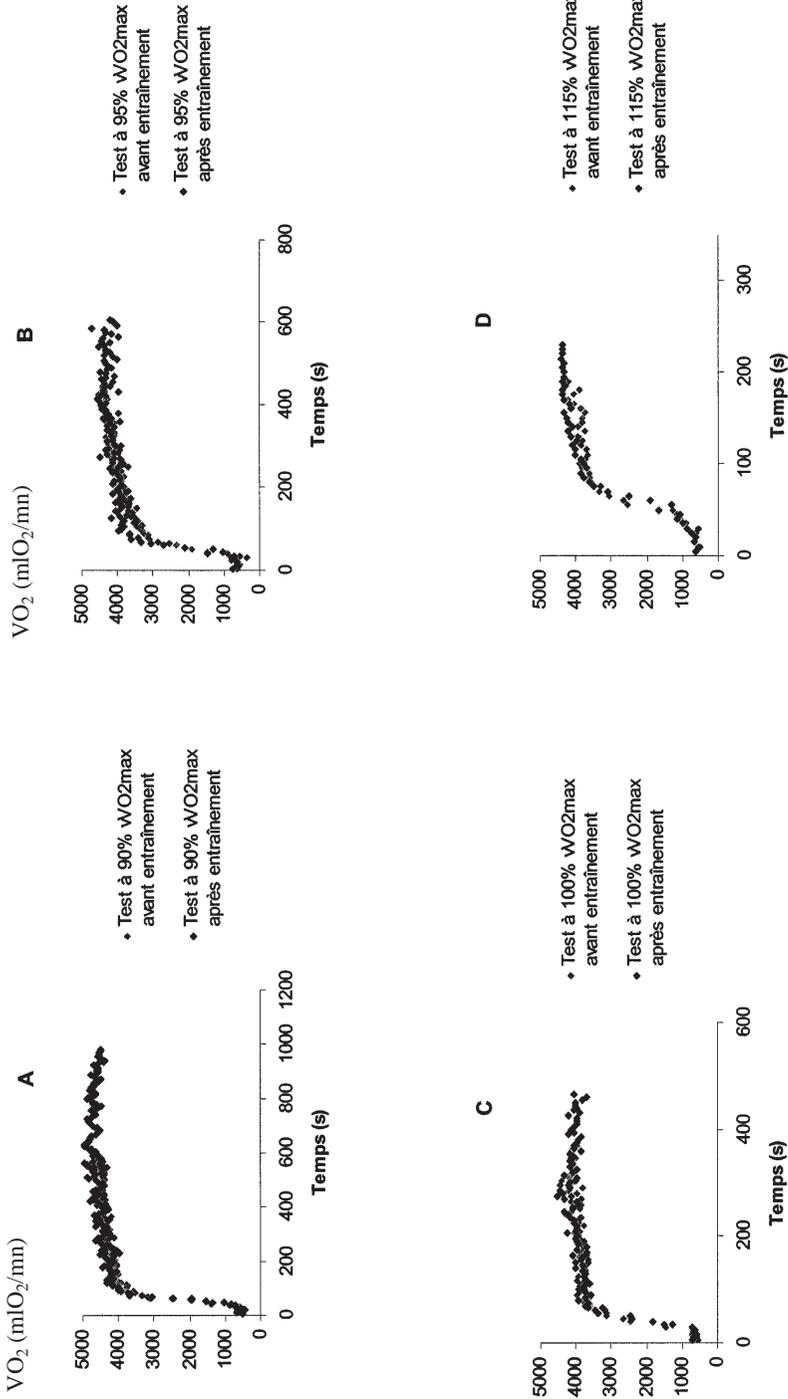


Figure 4. Cinétiques de la consommation d'oxygène, avant et après entraînement, lors des épreuves effectuées à 90% (A), 95% (B), 100% (C),

Tableau 5 Valeurs des tlim et tlim VO₂max obtenus durant le temps limite à CV' et des valeurs de la puissance critique

Sujets	CV' (km·h ⁻¹)	a' (m)	CV' (%vVO ₂ max)	tlim CV' (s)	tlim VO ₂ max CV' (s)	tlim VO ₂ max (% tlim)	CV (km·h ⁻¹)	a (m)	CV (% vVO ₂ max)
<u>Avant entraînement</u>									
<i>n</i> = 8									
Moyenne	13,8	117	86	887	574	66	12,9 ^c	316 ^d	80 ^e
ET	1,3	77	4	147	145	17	1,2	128	5
<i>n</i> = #	<i>n</i> = 6	<i>n</i> = 4	<i>n</i> = 6	<i>n</i> = 5	<i>n</i> = 5	<i>n</i> = 5			
Moyenne	13,9	122	85	924	566	63			
ET	1,3	99	4	156	163	22			
<u>Après entraînement</u>									
<i>n</i> = 8									
Moyenne	14,5	71	86	892	534	61	13,3 ^c	326 ^d	79 ^e
ET	1,4	72	5	160	314	33	1,3	69	5
<i>n</i> = #	<i>n</i> = 6	<i>n</i> = 4	<i>n</i> = 6	<i>n</i> = 5	<i>n</i> = 5	<i>n</i> = 5			
Moyenne	14,9 ^b	28	88	890	697	78			
ET	1,2	29	4	178	152	9			

Note: CV' = puissance critique à VO₂max; a' = distance parcourue à VO₂max à l'aide de l'énergie anaérobie de réserve restante après atteinte de VO₂max; tlim CV' = temps limite à CV'; tlim VO₂max CV' = temps passé à VO₂max durant le test à CV'; CV = puissance critique calculée à l'aide des tlim 90, 95, et 100% vVO₂max; a = distance parcourue utilisant les réserves en oxygène et le métabolisme anaérobie.

*2 sujets ont couru après entraînement à l'intensité relative de CV' avant entraînement (% vVO₂max) par impossibilité de détermination de CV' et a' après entraînement; **1 sujet n'a pas effectué le test à CV' après entraînement;

#Statistiques effectués avec nombre de sujet dont CV' est avant et après l'entraînement l'intensité qui sollicite le plus long temps VO₂max. Significativement différent: ^bdes valeurs avant entraînement; ^cde CV'; ^dde a'; ^ede CV' (% vVO₂max).

Le temps limite à VO₂max dépend des trois paramètres suivant: le temps limite, le temps d'atteinte de VO₂max, et la chute de VO₂. Ainsi, en accord avec la littérature, nos résultats sur le temps limite montrent qu'il est d'autant plus long que l'intensité d'exercice est faible et qu'il augmente avec l'entraînement (Billat et al., 1999; 2000a; Demarle et al., 2001; Hill et al., 1997). En effet, les performances réalisées avant entraînement à 90, 95, 100, et 115% vVO₂max correspondent, respectivement, après entraînement à des performances réalisées en moyenne à 85, 91, 96, et 109% vVO₂max. Ce résultat est le fait de l'augmentation de vVO₂max avec l'entraînement. Ainsi, en accord avec Jones et Carter (2000), l'amélioration des temps limites avec l'entraînement provoque un décalage de la courbe "tlim-vitesse" vers la droite (figure 3). Cela signifie que l'athlète doit courir à une vitesse de course absolue supérieure après entraînement pour solliciter le même temps limite.

Nos résultats en accord avec ceux de la littérature montrent que le temps pour atteindre VO₂max (TA VO₂max) est d'autant plus court que l'intensité d'exercice est élevée (Billat et al., 2000a; Hill et Ferguson, 1999; Hill et Smith, 1999). De plus, l'entraînement permettrait d'accélérer la cinétique de la consommation d'oxygène (Babcock et al., 1994; Phillips et al., 1995; Yoshida et al., 1992). Nos résultats, en accord avec Demarle et al. (2001), montrent effectivement que τ_1 est significativement plus court avec l'entraînement. Par ailleurs, certains auteurs ont suggéré que l'augmentation du temps limite à VO₂max pourrait découler d'une diminution du temps d'atteinte de VO₂max avec l'entraînement (Casaburi et al., 1987; Womack et al., 1995; Yoshida et al., 1992). Cependant ces hypothèses ne sont pas vérifiées dans notre étude, et il semble même qu'avec l'entraînement, le temps d'atteinte de VO₂max soit plus long. Cela provient du fait que la même vitesse absolue est plus petite, après entraînement, lorsqu'elle est exprimée en puissance relative à vVO₂max. Ce résultat est probablement dû à une modification du recrutement des unités motrices rapides et au phénomène de la composante lente (Womack et al., 1995). Cependant un entraînement sollicitant davantage la consommation d'oxygène au début d'exercice jusqu'à VO₂max permettrait peut-être une diminution du temps d'atteinte de VO₂max.

La chute linéaire de VO₂ en fin d'exercice a déjà été mise en évidence par de nombreux auteurs (Astrand et Saltin, 1961; Nummela et Rusko, 1995; Perrey et al., 2002). Ce phénomène a déjà été observé lors de test incrémentiel. Cependant il semble beaucoup plus fréquent lors de tests de temps limite, effectués à des intensités aussi bien supra maximales que sous maximales. La chute de VO₂ diminue par conséquent le temps limite à VO₂max. Cette chute de VO₂, encore inexplicée, est observée même chez des sportifs entraînés. Ainsi elle a été observée chez 93% des sujets (13 sur 14) dans l'étude de Nummela et Rusko (1995), chez 75% des sujets dans notre étude, et chez 54% des sujets dans celle de Perrey et al. (2002). Elle apparaît généralement en fin d'exercice mais parfois celle-ci débute dès le plateau de VO₂ atteint. Ainsi elle peut durer de quelques secondes à plusieurs minutes (2-3 mn) et peut représenter dans notre étude jusqu'à 30% du temps limite.

Par ailleurs, dans notre étude, chez les sujets ayant effectué des tests au même pourcentage de vVO₂max, avant et après entraînement, nous n'avons jamais constaté de chute de VO₂ dans les deux tests. Ainsi cette chute ne semble pas reproductible à 4 semaines d'intervalle lors de tests effectués en intensité absolue. Pour expliquer

ce phénomène, Perrey et al. (2002) ont montré qu'il était certainement dû à une fatigue des muscles respiratoires associée à une chute de la ventilation. McCole et al. (2001) ont montré que durant deux exercices de 6 et 12 minutes sollicitant VO_2max , la VO_2 restait constante alors que le débit cardiaque diminuerait légèrement durant le test de 12 minutes. Ainsi une chute du débit cardiaque plus importante (en particulier celle du volume d'éjection systolique) chez certains sujets, pourrait peut-être expliquer cette chute de VO_2 en fin d'exercice. Par ailleurs, cette chute du débit cardiaque pourrait être un facteur de l'arrêt d'exercice.

En résumé, le temps limite à VO_2max dépend essentiellement de la balance entre le temps limite et le temps d'atteinte de VO_2max . Ces deux paramètres, par ailleurs, augmenteraient avec l'entraînement et seraient d'autant plus long que l'intensité d'exercice est faible. La vitesse CV' serait par conséquent le meilleur compromis entre l'atteinte rapide de VO_2max et un t_{lim} long. Cependant, les variations du temps limite à VO_2max semblent plus liées au temps limite qu'au temps d'atteinte de VO_2max . Ainsi l'entraînement augmenterait le temps limite de façon plus importante que le temps d'atteinte de VO_2max , ce qui augmenterait le temps limite à VO_2max . Ce résultat est confirmé dans notre étude. En effet, pour de nombreux sujets, les tests effectués à 95 et 100% $v\text{VO}_2\text{max}$ après entraînement correspondent en relatif à des tests effectués à 90 et 95% $v\text{VO}_2\text{max}$ avant entraînement. Ainsi en intensité absolue, le temps limite à VO_2max de ces sujets est plus grand après entraînement en raison d'un t_{lim} plus long. Par contre en intensité relative, leur le temps limite à VO_2max est plus petit après entraînement en raison d'un temps limite plus court.

Cependant dans notre étude, en intensité absolue, le temps limite à VO_2max n'augmente pas significativement en raison probablement d'un nombre de séances d'entraînement trop faibles. Par ailleurs, en accord avec Billat et al. (2000a? 2001b?), aucune corrélation n'a été trouvée entre le temps limite et le temps limite à VO_2max . C'est pourquoi, comme le suggère Billat et al. (2000), le temps limite, le temps limite à VO_2max , et le temps d'atteinte de VO_2max étant soumis à de grandes variations interindividuelles, ils doivent être utilisés pour l'entraînement de manière individuelle (Billat et al., 1999; 2000; Faina et al., 1997; Hill et Ferguson, 1999).

Cette étude confirme que CV' est la vitesse qui permet le plus long temps limite à VO_2max durant un test à vitesse constante (Billat et al., 1999). Dans notre étude, CV' est égale en moyenne, avant et après entraînement, à 86% de $v\text{VO}_2\text{max}$. Ce résultat est en accord avec celui de Hill et al. (1997), qui ont montré expérimentalement que le temps limite à VO_2max à 92% $v\text{VO}_2\text{max}$ était supérieur à celui obtenu à 100% $v\text{VO}_2\text{max}$ (respectivement, 130 ± 66 s vs. 32 ± 41 s). Cependant en utilisant la même méthode que la nôtre, Billat et al. (1999) ont montré que CV' n'était pas statistiquement différent de $v\text{VO}_2\text{max}$. En fait, en utilisant des épreuves à 90, 100, 120, et 140% de $v\text{VO}_2\text{max}$ dans leur étude, Billat et al. ont probablement surestimé leur CV' . En effet, les faibles t_{lim} VO_2max observés à 90, 120, et 140% $v\text{VO}_2\text{max}$ dans leur étude ont entraîné une pente de la droite plus importante (Jenkins et Quigley, 1992). Nous avons également observés, dans notre étude, ces différences de résultat concernant l'intensité qui permet le plus long temps limite à VO_2max . En effet, CV' varie entre 81 et 90% $v\text{VO}_2\text{max}$ pour des sportifs mais non spécialistes d'endurance.

Ainsi, au regard de ces résultats, la courbe “ $t_{\text{lim}}\text{VO}_2\text{max}$ -vitesse” serait différente suivant le niveau des sujets. Ces variations seraient dues à l’amplitude de la composante lente de VO_2 qui serait plus faible chez les sujets entraînés (Billat et al., 1998). Cependant nos résultats et ceux de la littérature sont divergents concernant la diminution de cette amplitude de la composante lente avec l’entraînement (Carter et al., 2000; Demarle et al., 2001; Womack et al., 1995). Néanmoins, l’entraînement diminuerait ce phénomène mais cette diminution varierait suivant le niveau des sujets, le type et la durée d’entraînement. En effet, l’amplitude de la composante lente serait liée à l’intensité d’exercice avec le recrutement des unités motrices rapides (Carter et al., 2002). Ainsi le développement des paramètres aérobies avec l’entraînement modifieraient le recrutement ces unités motrices rapides (Xu et Rhodes, 1999). Elles seraient recrutées après entraînement à des intensités supérieures en valeur absolue et relative.

Par conséquent, la diminution de l’amplitude de la composante lente avec l’entraînement ne permettrait plus, pour des vitesses inférieures à $v\text{VO}_2\text{max}$, d’atteindre VO_2max . De plus pour les intensités ou la composante lente n’intervient pas dans l’atteinte de VO_2max , le temps limite à VO_2max serait plus grand, après entraînement, en raison d’un temps limite plus long (Demarle et al., 2001). Par conséquent, la courbe “ $t_{\text{lim}} \text{VO}_2\text{max}$ -vitesse” serait décalée vers la droite. Les sujets entraînés atteindraient VO_2max à des intensités (absolues et relatives) supérieures aux sujets non entraînés (Carter et al., 2000; Gaesser et Poole, 1996; Womack et al., 1995). Ainsi, l’intensité qui permettrait le plus long temps limite à VO_2max (CV') serait au alentour de 100% $v\text{VO}_2\text{max}$ pour les sujets très entraînés alors qu’elle serait de 85% à 90% $v\text{VO}_2\text{max}$ pour les sujets peu entraînés (Billat et al., 2000a; Hill et al., 1997) (figure 1).

Cependant, dans notre étude, aucune augmentation de CV' en valeur relative n’a été observée en raison probablement d’un entraînement trop court. Cependant avec l’entraînement, le temps limite à VO_2max a augmenté en moyenne pour chaque intensité absolue. Cette augmentation, en proportion plus importante à 90 et 95% $v\text{VO}_2\text{max}$ qu’à 100% $v\text{VO}_2\text{max}$, a pour conséquence une augmentation de CV' en valeur absolue. Ce résultat est en accord avec Jenkins et Quigley (1992) qui ont observé, en utilisant la même méthode que dans notre étude, une augmentation de CV après 8 semaines d’entraînement en aérobie.

Pour développer la VO_2max des athlètes, deux paramètres d’entraînement apparaissent comme indispensables, mais ne sont pas exclusifs cependant: il s’agit de la sollicitation du VO_2max et de la durée de cette sollicitation (Astrand et Rodahl, 1986; Saltin et al., 1968). Cependant, sur la plage d’intensité permettant de solliciter VO_2max , l’intensité d’entraînement optimale reste à déterminer. Karlson et al. (1967) avaient suggéré que si VO_2max pouvait être atteinte pour des intensités d’exercices sous maximales, cette plus faible intensité pourrait être suffisante et peut être même optimale comme stimulus d’entraînement. Ainsi CV' apparaît par conséquent comme une intensité intéressante pour développer la VO_2max . Cependant même si les exercices de types intermittents permettent un plus long temps limite à VO_2max que les exercices continus (Astrand et Rodahl, 1986; Billat et al., 2000b), CV' reste néanmoins intéressante car elle permettrait de faire varier les formes d’entraînement.

Conclusion

Cette étude montre que le temps limite à VO_2max n'a pas été significativement augmenté par cet entraînement. Cependant pour solliciter le même temps limite à VO_2max après entraînement, le sujet doit courir à une intensité, relative à $v\text{VO}_2\text{max}$, supérieure. Par ailleurs, CV' est l'intensité qui permet le plus long temps limite à VO_2max lors d'un test à vitesse constante jusqu'à épuisement. CV' augmente avec l'entraînement en valeur absolue mais pas en valeur relative à $v\text{VO}_2\text{max}$ puisque $v\text{VO}_2\text{max}$ est augmentée dans les mêmes proportions que CV' après entraînement. Cependant CV' varie entre 80 et 100% $v\text{VO}_2\text{max}$ suivant le niveau des sportifs, et l'individualisation de l'entraînement semble nécessaire pour solliciter VO_2max lors d'entraînement intermittent long.

Références

- Astrand, P.O., and Rodahl, K. (1986). **Textbook of Work Physiology**. New York: McGraw-Hill.
- Astrand, P.O., and Saltin, B. (1961). Oxygen uptake during the first minutes of heavy muscular exercise. **J. Appl. Physiol.** 16: 971-976.
- Aunola, S., and Rusko, H. (1984). Reproducibility of aerobic and anaerobic thresholds in 20- 50-years-old men. **Eur. J. Appl. Physiol.** 53: 260-266.
- Babcock, M.A., Paterson, D.H., and Cunningham, D.A. (1994). Effects of aerobic endurance training on gas exchange kinetics of older men. **Med. Sci. Sports. Exerc.** 26: 447-452.
- Barstow, T.J., and Mole, P.A. (1991). Linear and non-linear characteristics of oxygen uptake kinetics during heavy exercise. **J. Appl. Physiol.** 71: 2099-2106.
- Billat, V.L. (2001a). Interval training for performance: A scientific and empirical practice (Part 1). **Sports Med.** 31: 13-31.
- Billat, V.L. (2001b). Interval training for performance: A scientific and empirical practice (Part 2). **Sports Med.** 31: 75-90.
- Billat, V.L., Blondel, N., and Berthoin, S. (1999). Determination of the velocity associated with the longest time to exhaustion at maximal oxygen uptake. **Eur. J. Appl. Physiol.** 80: 159-161.
- Billat, V.L., and Koralsztein, J.P. (1996). Significance of the velocity at VO_2max and time to exhaustion at this velocity. **Sports Med.** 16: 312-327.
- Billat, V.L., Morton, R.H., Blondel, N., Berthoin, S., Bocquet, V., Koralsztein, J.P., and Barstow, T.J. (2000a). Oxygen kinetics and modelling of time to exhaustion whilst running at various velocities at maximal oxygen uptake. **Eur. J. Appl. Physiol.** 82: 178-187.
- Billat, V.L., Richard, R., Binsse, V.M., Koralsztein, J.P., and Haouzi, P. (1998). The VO_2 slow component for severe exercise depends on type of exercise and is not correlated with time to fatigue. **J. Appl. Physiol.** 85: 2118-2124.
- Billat, V.L., Slawinski, J., Bocquet, V., Demarle, A., Laffite, L., Chassaing, P., and Koralsztein, J.P. (2000b). Intermittent runs at the velocity associated with maximal oxygen uptake enables subjects to remain at maximal oxygen uptake for a longer time than intense but submaximal runs. **Eur. J. Appl. Physiol.** 81: 188-196.
- Carter, H., Jones, A.M., Barstow, T.J., Burley, M., Williams, C., and Doust, J.H. (2000).

- Effect of endurance training on oxygen uptake kinetics during treadmill running. **J. Appl. Physiol.** 89: 1744-1752.
- Carter, H., Pringle, J.S., Jones, A.M., and Doust, J.H. (2002) Oxygen uptake kinetics during treadmill running across exercise intensity domains. **Eur. J. Appl. Physiol.** 86: 347-354.
- Casaburi, R., Storer, T.W., Ben-Dov, I., and Wasserman, K. (1987). Effect of endurance training on possible determinants of VO₂ during heavy exercise. **J. Appl. Physiol.** 62: 1533-1538.
- Demarle, A.P., Slawinski, J.J., Laffite, L.P., Bocquet, V.G., Koralsztein, J.P., and Billat, V.L. (2001). Decrease of oxygen deficit is a potential factor in increased time to exhaustion after specific endurance training. **J. Appl. Physiol.** 90: 947-953.
- Ettema, J.H. (1966). Limits of human performance and energy production. **Int. Z für Angew. Physiol. Einschl Arbeitphysiol.** 22: 45-54.
- Faina, M., Billat, V., Squadrone, R., De Angelis, M., Koralsztein, J.P., and Dal Monte, A. (1997). Anaerobic contribution to the time to exhaustion at the minimal exercise intensity at which maximal oxygen uptake occurs in elite cyclists, kayakists and swimmers. **Eur. J. Appl. Occup. Physiol.** 76: 13-20.
- Gaesser, G.A., and Poole, D.C. (1996). The slow component of oxygen uptake kinetics in humans. **Exerc. Sports Sci. Rev.** 24: 35-71.
- Gorostiaga, E.M, Walter, C.B., Foster, C., and Hickson, R.C. (1991). Uniqueness of interval and continuous training at the same maintained exercise intensity. **Eur. J. Appl. Occup. Physiol.** 63: 101-107.
- Hill, D.W., and Ferguson, C.S. (1999). A physical description of critical velocity. **Eur. J. Appl. Physiol.** 79: 290-293.
- Hill, D.W., and Smith, J.C. (1999). Determination of critical power by pulmonary gas exchange. **Can. J. Appl. Physiol.** 24: 74-86.
- Hill, D.W., Williams, C.S., and Burt, S.E. (1997). Responses to exercise at 92% and 100% of the velocity associated with VO₂max. **Int. J. Sports Med.** 18: 325-329.
- Howley, E.T., Bassett, D.R., and Welch, H.G. (1995). Criteria for maximal oxygen uptake: Review and commentary. **Med. Sci. Sports Exerc.** 27: 1292-1301.
- Jenkins, D.G., and Quigley, B.M. (1992). Endurance training enhances critical power. **Med. Sci. Sports Exerc.** 24: 1283-1289.
- Jones, A.M., and Carter, H. (2000). The effect of endurance training on parameters of aerobic fitness. **Sports Med.** 29: 373-386.
- Karlsson, J., Astrand, P.O., and Ekblom, B. (1967). Training of oxygen transport system in man. **J. Appl. Physiol.** 22: 1061-1065.
- Kuipers, H., Verstappen, F.T.J., Keize, H.A., Guerten, P., and Van Kranenburg, G. (1985). Variability of anaerobic performance in the laboratory and its physiologic correlates. **Int. J. Sports Med.** 6: 197-201.
- Linnarsson, D., Karlsson, J., Fagraeus, L., and Saltin, B. (1974). Muscle metabolites and oxygen deficit with exercise in hypoxia and hyperoxia. **J. Appl. Physiol.** 36: 399-402.
- McCole, S.D., Davis, A.M., and Fueger, P.T. (2001). Is there a dissociation of maximal oxygen consumption and maximal cardiac output? **Med. Sci. Sports Exerc.** 33: 1265-1269.
- McLaughlin, J.E, King, G.A., Howley, E.T., Bassett, D.R., and Ainsworth, B.E. (2001). Validation of the COSMED K4b² portable metabolic system. **Int. J. Sports Med.** 22: 280-284.

Morgan (1996). \ Au: cited in Introduction, para 2

xx

- Nummela, A., and Rusko, H. (1995). Time course of anaerobic and aerobic energy expenditure during short-term exhaustive running in athletes. **Int. J. Sports Med.** 16: 522-527.
- Perrey, S., Candau, R., Millet, G.Y., Borrani, F., and Rouillon, J.D. (2002). Decrease in oxygen uptake at the end of a high-intensity submaximal running in humans. **Int. J. Sports Med.** 23: 298-304.
- Phillips, S.M., Green, H.J., MacDonald, M.J., and Hughson, R.L. (1995). Progressive effect of endurance training on VO₂ kinetics at the onset of submaximal exercise. **J. Appl. Physiol.** 79: 1914-1920.
- Saltin, B., Blomqvist, B., Mitchell, J.H., Johnson, R.L., Wildenthal, K., and Chapman, C.B. (1968). Response to submaximal and maximal exercise after bed rest and training. **Circulation** 38 (Suppl. 7).
- Scherrer, J., Samson, M., et Paléologue, A. (1954). Etude du travail musculaire et de la fatigue. Données ergométriques obtenues chez l'homme. **J. Physiol.** 46: 887-916.
- Smith, T.P., McNaughton, L.R., and Marshall, K.J. (1999). Effects of 4 weeks training using V_{max}/T_{max} on VO₂max and performance in athletes. **Med. Sci. Sports Exerc.** 31: 254-257.
- Vandewalle, H., Vautier, J.F., Kachouri, M., Lechevalier, J.M., and Monod, H. (1997). Work-exhaustion time relationships and the critical power concept. **J. Sports Med. Phys. Fitness** 37: 89-102.
- Womack, C.J., Davis, S.E., Blumer, J.L., Barrett, E., Weltman, A.L., and Gaesser, G.A. (1995). Slow component of oxygen uptake during heavy exercise: Adaptation to endurance training. **J. Appl. Physiol.** 79: 838-845.
- Xu, F., and Rhodes, E.C. (1999). Oxygen uptake kinetics during exercise. **Sports Med.** 27: 313-327.
- Yoshida, T., Udo, M., Omhori, T., Matsumoto, Y., Uramoto, T., and Yamamoto, K. (1992). Day-to-day changes in oxygen uptake kinetics at the onset of exercise during strenuous endurance training. **Eur. J. Appl. Physiol.** 64: 78-83.

Received January 16, 2003; accepted in final form May 10, 2003.