TABLE DES MATIÈRES

LES SYSTEMES ÉNERGETIQUES ANAÉROBIES ET LA PERFORMANCE EN ENDURANCE DES CYCLISTES SELON LE TYPE DE PARCOURS i

RÉSUMÉ ii

REMERCIEMENTS v

LISTE DES FIGURES viii

LISTE DES ABRÉVIATIONS ix

INTRODUCTION 12

1. LA PERFORMANCE EN ENDURANCE 13

1.1. La consommation maximale d'oxygène 14

1.2. L'économie à l'effort 17

1.3. Le seuil lactique 23

1.3.1. Le concept du seuil lactique 23

1.3.5. Le SL2 et la performance en endurance 30

1.4. La puissance aérobie maximale 32

1.5. La cinétique du VO_2 34

1.6. La ventilation 37

1.7. Le métabolisme anaérobie 38

1.8. Conclusion : 45

2. COMMENT MESURER LE MÉTABOLISME ANAÉROBIE DES CYCLISTES 48

2.1. La puissance anaérobie et les tests d'évaluation: 49

2.2. La capacité anaérobie et les tests d'évaluation : 50

2.2.1. Le déficit maximal d'oxygène accumulé (DMOA) : 50

2.2.2. L'efficacité brute (EB) 53

2.2.3. Le concept de la puissance critique (PC-W') 55

2.2.3.1. Les modes d'estimation de la PC et du W' : 56

2.2.4. La comparaison entre les méthodes d'estimation de la capacité anaérobie chez les cyclistes : 58

2.3. Conclusion : 58

3. LES TESTS DE 3 MIN SUPRAMAXIMAUX : **60**

3.1. Origine et développement du test de 3min supramaximal 60

3.2. Test de 3 min supramaximal sur ergocycle électromagnétique 61

3.3. Test supramaximal de 3 min sur un ergocycle Monark : 62

3.4. Test supramaximal de 3 min avec la bicyclette personnelle du sujet 63

4. HYPOTHÈSE : **66**

5. LES SYSTEMES ÉNERGETIQUES ANAÉROBIES ET LA PERFORMANCE EN ENDURANCE DES CYCLISTES SELON LE TYPE DE PARCOURS **67**

Résumé : 68

Introduction 70

Méthodologie 71

Résultats 79

Discussion 89

Limites de l'étude 95

Conclusion 96

Référence : 98

6. DISCUSSION GÉNÉRALE **102**

7. RÉFÉRENCES GÉNÉRALES **110**

Annexe « A »: **120**

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Cinétique du lactate au cours d'un test deVO_2max 23

Figure 2 : Détermination de différentes zones d'exercice par l'analyse de l'oxygène et de l'acide lactique 34

Figure 3 : Calcul du déficit maximal d'oxygène accumulé au cours d'un exercice constant à une intensité très élevée 51

Figure 4 : Calcul de l'efficacité brute avec un exercice sous-maximal amenant à l'épuisement 53

Figure 5 : Les trois modes de calcul les plus naturels de la puissance critique et de la capacité anaérobie 56

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ATP : adénosine triphosphate

(CaO_2-CvO_2) : différence artérioveineuse

CE : Coût énergétique

CP : créatine phosphate

DMOA : déficit maximal d'oxygène accumulé

EB : efficacité brute

EC : économie de cyclisme

EE : économie à l'effort

EM : efficacité mécanique

IPmax : indice de la puissance aérobie maximale

IF : indice de fatigue

min : minute

PAM : puissance aérobie maximale

PC : puissance critique

PC-W' : le concept de la puissance critique

$PC_{3\ min}$: test de 3 min supramaximal fait avec le protocole de Burnley et coll. (2006)

$PC_{3,5\%}$: test de 3 min supramaximal sur Monark avec charge de résistance de 3,5% du poids du corps

$PC_{4,5\%}$: test de 3 min supramaximal sur Monark avec charge de résistance de 4,5% du poids du corps

3min^{SM}: test de 3 min supramaximal fait sur le Computrainer™ avec la bicyclette personnelle du sujet

PCR : point de compensation respiratoire

PF : puissance finale

PM : puissance moyenne

$PM_{aérobie}$: puissance mécanique aérobie

P-MLSS : puissance associée à l'état stable maximal de lactatémie

PP : puissance pic

P-PCR : puissance associée au point de compensation respiratoire

P-SL2 : puissance associée au seuil anaérobie

Qc : débit cardiaque

RM : répétition maximale

rpm : révolutions par minute

s : seconde

SL1 : seuil aérobie

SL2 : seuil anaérobie

VCO_2 : volume de dioxyde de carbone

VE : ventilation

VES : volume d'éjection systolique

VO_2max : consommation maximale d'oxygène

VO_2 : volume d'oxygène

W' : capacité anaérobie déterminée par le concept de la puissance critique

/r : relative au poids du corps

INTRODUCTION

Le jeu des paramètres physiologiques qui expliquent et limitent la progression des athlètes dans les sports d'endurance n'est pas totalement élucidé. Archibald Vivian Hill, prix Nobel de 1923, a développé le premier modèle physiologique qui explique la physiologie de la performance en endurance et ses facteurs limitatifs. Ultérieurement, Roy J. Shephard, qui est l'un des grands chercheurs dans ce domaine, a expliqué le modèle de A.V. Hill de façon plus complète et précise (Noakes, 2011; Shephard, 2009). Notre recherche, qui s'inscrit dans cette perspective, tentera de cerner certains processus clés de la performance en endurance, plus spécifiquement chez les cyclistes de route, en discutant la différence entre différents modèles physiologiques développés récemment. Ceux-ci nous permettront de mettre sur pied un protocole pour estimer les différents paramètres physiologiques utiles à la compréhension de la performance en endurance.

Dans le cadre de ce mémoire, la problématique est écrite sous forme d'un article de synthèse. Chaque chapitre traite un paramètre physiologique et est divisé en trois grandes parties. Dans un premier temps, le paramètre est défini et expliqué en détail. On décrit ensuite la ou les meilleures méthodes d'évaluation du paramètre, et on termine en discutant de sa relation dudit paramètre avec la performance en endurance. Le choix d'adopter une telle stratégie d'écriture est basé sur trois objectifs pour écrire un document qui:

1) peut être utilisé ultérieurement par des étudiants, des athlètes et des entraîneurs cherchant des informations récentes sur les plans fondamental et professionnel;

Rapport-Gratuit.com

2) discute les dernières recherches pertinentes en performance en endurance des cyclistes afin d'identifier les voies de recherche futures;

3) d'une part, nous amène à formuler des hypothèses de recherche mesurables afin d'améliorer notre compréhension de la physiologie de l'endurance chez les cyclistes de route et, d'autre part, nous permet de valider éventuellement un modèle physiologique de la performance en endurance en général.

1. LA PERFORMANCE EN ENDURANCE

Jones et Carter (2000) ont affirmé que quatre paramètres clés influencent la performance en endurance des cyclistes et des coureurs de longues distances: la consommation maximale d'oxygène (VO_2 max), le seuil lactique (SL2), l'économie à l'effort (EE) et la cinétique du VO_2. D'autre part, Faria et coll. (2005a) ont considéré que les épreuves d'endurance de cyclisme sont influencées par cinq paramètres: le VO_2max, la puissance aérobie maximale (PAM), le seuil lactique (SL2), l'économie à la course (EC) et la ventilation (VE). Impellizzeri et coll. (2007) ajoutent qu'une meilleure capacité anaérobie (W') est l'un des facteurs physiologiques qui influencent la performance en endurance avec le VO_2 max et le SL2 chez les cyclistes de montagne.

La recherche la plus récente à notre connaissance est celle de Joyner et Coyle, (2008), dans laquelle ils ont créé un modèle physiologique expliquant la performance en endurance pour tous types de sports, mais plus spécifiquement pour la course et le cyclisme. Ce modèle regroupe le VO_2max, le SL2, la W' et l'économie à l'effort.

Il est intéressant que les quatre études mentionnées ci-dessus proposent en commun trois paramètres physiologiques déterminant la performance en endurance; le

VO_2 max, le SL2 et l'EE. Mais, on remarque dernièrement l'addition du métabolisme anaérobie, qui était souvent négligé comme contributeur à la performance en endurance (Joyner et Coyle, 2008). Dans les prochains paragraphes, nous allons définir chaque paramètre physiologique et ensuite décrire sa relation réelle ou potentielle avec la performance en endurance des cyclistes.

1.1. La consommation maximale d'oxygène

Le VO_2 max représente la quantité maximale d'oxygène pouvant être prélevée par les poumons, transportée par le sang et captée par les muscles afin d'être utilisée dans la chaîne de transport des électrons dans les mitochondries. En d'autres termes, le VO_2max est considéré comme un paramètre qui reflète l'implication des systèmes pulmonaire, circulatoire et musculaire dans l'extraction et la consommation de l'oxygène. La consommation maximale d'oxygène peut être exprimée soit d'une manière absolue ($L.min^{-1}$), soit d'une manière relative par rapport au poids corporel ($ml.kg^{-1}.min^{-1}$) (Wilmore et Costill, 2002). Le VO_2max peut être notamment mesuré de trois manières, soit par un test maximal à charge progressive croissante avec mesure directe, ou par un exercice continu à une intensité élevée (> SL2), ou encore par une estimation avec un test supra maximal de 3 min (Burnley et coll., 2006; Johnson et coll., 2011; Vanhatalo et coll., 2007).

Le corps humain fournit de l'énergie à travers deux grands systèmes métaboliques, le système aérobie et le système anaérobie. Chaque système énergétique se caractérise par sa puissance et sa capacité, et le VO_2 max représente la puissance maximale du système aérobie (Impellizzeri et coll., 2007; Wilmore et Costill, 2002).

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

En effet, le VO_2 max est le produit du travail des systèmes pulmonaire, cardiovasculaire et musculaire, et son augmentation est reliée directement à l'évolution de l'un ou de l'ensemble de ces systèmes, comme par exemple le volume d'éjection systolique (VES), le volume de sang, la densité des capillaires et des mitochondries (Joyner et Coyle, 2008). Le système cardiovasculaire, plus précisément le débit cardiaque (Q_C) semble être le facteur principal limitant l'amélioration du VO_2 max, plutôt que la capacité des muscles à diffuser l'oxygène du sang au milieu intramusculaire et à le consommer ou la capacité des poumons à mettre à disposition la quantité d'oxygène nécessaire à l'exercice (Jones et Carter, 2000).

En effet, le Qc est le produit du volume d'éjection systolique (VES) et de la fréquence cardiaque (F_C). La loi de Fick (1980) est exprimée comme «VO_2 max = Qc x (CaO_2–CvO_2)» (Bhambhani et coll., 2010). Cette loi exprime la relation directe entre le VO_2max et ses composantes centrale (débit cardiaque) et périphérique (différence artérioveineuse en oxygène). De ce fait, le VO_2 max est atteint dans le cas où le débit cardiaque (Qc) et la différence artérioveineuse en oxygène atteignent leur maximum (Billat, 2003). Zhou et coll. (2001) ont montré qu'il y a une différence significative du VO_2 max entre les athlètes moyennement entraînés et les élites : seul le Qc de ces derniers augmente significativement tandis que la différence artérioveineuse reste la même pour les deux groupes lors d'une test à intensité croissante.

Zhou et coll. (2001) ont montré aussi que le volume d'éjection systolique (VES) est significativement plus haut chez les athlètes de haut niveau par rapport aux autres athlètes, alors que la fréquence cardiaque maximale (Fcmax) est la même chez les deux groupes. De plus, le VES des athlètes d'élite ne se stabilise pas à 50-60 % de

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

VO_2 max comme chez les personnes en moins bonne condition physique, mais continue à augmenter jusqu'à 100 % du VO_2. Ainsi, le VES semble être le facteur limitatif du Qc et par conséquent de l'amélioration du VO_2 max.

En conséquence, puisque le système cardiovasculaire est le facteur limitant du VO_2 max, il jouerait un rôle majeur dans son évolution.

1.1.2. Le VO_2max et la performance en endurance

Depuis longtemps, le VO_2 max est reconnu comme un paramètre important dans la détermination de la performance en endurance des athlètes (Bentley et coll., 1998; Coyle et coll., 1991; Coyle et coll., 1988; Faria et coll., 2005; Gregory et coll., 2007). En effet, les spécialistes en cyclisme de route, grimpeur, de montagne et tout terrain, participants au Championnat du monde, obtiennent des valeurs de VO_2 max supérieures à 74 $ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$, dont la plupart atteignent les 80 $ml.kg^{-1}.min^{-1}$ (Padilla et coll., 1999).

Le VO_2 max absolu chez les cyclistes de route de haut niveau est significativement plus élevé que celui des grimpeurs (Padilla et coll., 1999). Par contre, en termes relatifs, les résultats s'inversent et le VO_2max relatif des grimpeurs devient significativement plus élevé que celui des cyclistes de route, meilleurs sur parcours plat. Ceci est expliqué par le poids plus élevé remarqué chez les cyclistes de route par rapport aux cyclistes grimpeurs (Impellizzeri et coll., 2008; Padilla et coll., 1999). Heil et coll. (2001) ont aussi montré que, contrairement aux autres paramètres, le VO_2 ne devient significativement corrélé avec la performance sur un parcours ascendant que lorsqu'il est exprimé en termes relatifs au poids. C'est pourquoi le VO_2max relatif des cyclistes grimpeurs est plus représentatif de leur capacité physique et un meilleur

prédicteur de leur performance. L'amélioration du VO_2 max est généralement accompagnée d'une augmentation de la performance en endurance. L'amélioration du VO_2max dépend de plusieurs facteurs tels que le volume de l'entraînement, la fréquence, l'intensité et la durée des séances. Mais jusqu'à nos jours, on n'a pas déterminé un type d'entraînement optimal qui vise spécifiquement le VO_2max (Jones et Carter, 2000). Généralement, un entraînement qui applique une charge autour de la puissance associée au VO_2max semble le plus efficace. La puissance de l'exercice varie selon le type de l'entraînement. En effet, pour des entraînements par intervalles, il est recommandé de travailler à 100% du VO_2max, voire à 110%, tandis que, pour un entraînement continu, un travail à 80% - 90% du VO_2max est le plus efficace (Billat et coll., 2003; Buchheit et Laursen, 2013).

À un certain niveau d'entraînement, le gain de VO_2 max plafonne, mais la performance des athlètes continue à augmenter. Cela apparaît en relation avec l'évolution d'autres paramètres, comme l'économie à l'effort et le seuil lactique (Jones, 1998; Jones et Carter, 2000; Sunde et coll., 2010). Ces facteurs périphériques restent encore à discuter.

1.2. L'économie à l'effort

L'économie à l'effort est un paramètre qui représente le niveau d'efficacité de l'organisme pour transformer l'énergie chimique produite par les muscles en énergie mécanique traduite en vitesse ou en puissance selon le type de l'activité (Joyner et Coyle, 2008). L'économie à l'effort (EE) chez les cyclistes est connue sous deux formes : l'économie de cyclisme et l'efficacité mécanique. L'économie de cyclisme (EC) est la quantité d'oxygène utilisée au cours d'un exercice continu à une puissance

absolue constante sous-maximale (Faria et coll., 2005; Jones et Carter, 2000).

L'efficacité mécanique (EM) (équation 1) est le travail total accompli pendant l'exercice, divisé par la dépense énergétique totale moins l'énergie du métabolisme de base, et elle est exprimée en pourcentage (Sunde et coll., 2010), soit :

(EM) = [Taux de travail / (Énergie totale – Métabolisme de base)] x 100 (Éq. 1)

Cependant, l'EM est limitée par l'intensité de l'exercice; elle ne peut pas être calculée si le quotient respiratoire est supérieur à 1 pendant l'effort (Faria et coll., 2005). Ce qui la rend difficile à considérer comme paramètre prédicteur, car le quotient respiratoire n'est pas toujours inférieur à 1 au cours de la performance en endurance.

Pour mieux comprendre comment on met en pratique ces deux différents types de calcul, voici un exemple. Un cycliste fait un test d'économie à l'effort dans lequel il a pédalé à 60% de sa PAM pendant 6 min ; l'économie de cyclisme, qui correspond à la moyenne d'oxygène consommé de la 3ième à la 6ième minute, est égale à 45 $mlO_2.kg^{-1}.min^{-1}$. et son EM = 20%. Si, après un entraînement d'endurance, l'EC diminue à 40 $mlO_2.kg^{-1}.min^{-1}$, le cycliste devient « plus économe ». Dans le même cas, si l'EM a augmenté à 23%, le cycliste devient plus efficace mécaniquement.

L'économie du cyclisme et l'efficacité mécanique sont les paramètres les plus faciles à mesurer, mais ce sont aussi les plus difficiles à expliquer, car ils sont influencés par plusieurs facteurs qui interagissent afin de produire la valeur finale. Il s'agit de facteurs biomécaniques, physiologiques, métaboliques, techniques et morphologiques (Faria et coll., 2005 ; Jones et Carter, 2000 ; Joyner et Coyle, 2008 ; Sallet et coll., 2006).

Sur les plans physiologique et métabolique, Coyle et coll. (1992) ont indiqué que le pourcentage de fibres lentes (type I) par rapport aux fibres rapides est l'un des facteurs les plus importants qui influencent l'EE. En effet, chez 19 cyclistes d'endurance, le pourcentage des fibres lentes est positivement corrélé avec leur EE ($r = 0,75$; $p<0,001$).

Sur le plan physiologique, le système neuromusculaire joue un grand rôle dans l'amélioration de l'EE des athlètes. Dans ce contexte, Jones et Carter (2000) et Buchheit et Laursen (2013) ont postulé que le développement du système de recrutement des unités motrices et l'évolution de la synchronisation entre les muscles agonistes, antagonistes et entre les muscles de la même fonction cinétique permettent de garder une vitesse élevée en perdant moins d'énergie. Ceci influencerait directement et positivement l'économie à l'effort, mais cette interprétation requiert encore une vérification expérimentale.

Sur les plans technique et métabolique, plusieurs chercheurs ont étudié la relation entre cadence de pédalage et économie à l'effort. Abbiss et coll. (2009) ont mentionné dans leur article de synthèse que la cadence optimale pour les cyclistes change selon la durée et l'intensité de l'exercice. En conséquence, une cadence de 100 à 120 rpm est recommandée pour les cyclistes qui font des compétitions de courte distance et d'intensité élevée et une cadence de 90 à 100 rpm pour les compétitions d'endurance alors qu'une cadence inférieure à 90 rpm est préconisée pour les compétitions de très longue distance tel l'ultra marathon.

D'autre part, la technique du pédalage avec dorsiflexion des chevilles n'est pas recommandée. Cette technique diminue l'EM des cyclistes de 2,6 % par rapport à

l'épreuve de cyclisme avec technique normale, car cette technique augmente significativement le travail musculaire des gastrocnémiens (Cannon et coll., 2007).

Une autre raison se rapporte aux plans biomécanique et métabolique. Par exemple, lorsque la hauteur de la selle du vélo est réglée afin que le genou crée un angle de 25°, les cyclistes développent davantage de puissance et deviennent encore plus économes (Peveler et Green, 2011).

Puisque les facteurs qui déterminent la valeur de l'EE ou l'EM sont multiples, les types d'entraînement qui améliorent ces derniers sont divers.

L'entraînement par intervalles à une intensité élevée est efficace pour améliorer l'économie à l'effort et l'efficacité mécanique en augmentant l'oxydation des lipides par rapport au glycogène musculaire (Jones et Carter, 2000; Stöggl et Sperlich, 2014; Talanian et coll., 2007). Cependant, il semblait que le moyen le plus efficace pour augmenter l'EE est l'entraînement à une basse intensité (SL1) avec un grand volume (Faria et coll., 2005a).

Les études faites chez des cyclistes sont considérées aussi comme l'un des arguments montrant la possibilité d'augmenter l'économie à l'effort. La recherche de Coyle (2005) faite pendant sept ans avec un cycliste d'endurance, sept fois gagnant du Tour de France à la fin de sa carrière sportive, a montré que son EE a augmenté de 8 %.

Hopker et coll. (2007) ont réalisé une étude transversale dans laquelle ils ont comparé des cyclistes entraînés avec des non entraînés. Grâce à une différence significative de l'économie à l'effort brute à différentes intensités relatives et non relatives, ils ont conclu que l'expérience des athlètes est l'un des facteurs qui

influencent l'EE. Joyner et Coyle, (2008) mentionnent que l'entraînement continu en endurance augmente l'économie à l'effort de 1 à 3 % par année.

Sunde et coll. (2010) ont montré que, chez un groupe de 7 hommes et une femme, cyclistes de route entraînés (VO_2 max : 63,04 ± 6,0 $ml.kg^{-1}.min^{-1}$, SL2 : 77 ± 3 % VO_2 max, PAM : 360 ± 101 W), l'entraînement de musculation 4 × 4RM demi-squat 3 fois par semaine, ajouté au programme d'endurance habituel pendant 8 semaines, a permis d'augmenter significativement l'efficacité mécanique, l'économie à l'effort et le temps limite de l'exercice maintenu à la puissance aérobie maximale. Cette modification est enregistrée sans modification du VO_2 max, du poids des athlètes ou de la cadence (rpm). Les mêmes résultats au niveau de l'EM ont été enregistrés avec un entraînement d'extension du genou de 10 x 10 à 70 %RM pendant 3 semaines (Louis et coll., 2012). L'amélioration de l'EE ou l'EM suite à un entraînement de musculation est probablement causée par une amélioration du système neuromusculaire suite à une meilleure coordination entre les muscles synergiques et antagonistes, en plus d'un meilleur recrutement spatio-temporel des fibres musculaires actives (Sunde et coll., 2010). D'autres évidences montrent que le travail de musculation augmente la synthèse des fibres rapides (Louis et coll., 2012). Par conséquent, l'entraînement de musculation n'engendre pas des améliorations métaboliques au niveau du système aérobie, mais une amélioration mécanique attribuable au facteur neuromusculaire d'une part et d'autre part une amélioration du métabolisme anaérobie qui peut reprendre une partie du travail accompli par le métabolisme aérobie. Pour cela, on remarque une diminution de la consommation d'oxygène à la même intensité absolue, ce qui est expliqué par une amélioration de l'EE et l'EM. Donc, puisque ce type d'entraînement permet d'améliorer l'EE et l'EM sans modification du système aérobie,

on peut se demander si ce type d'entraînement est efficace afin d'améliorer la performance de longue durée?

D'autres moyens que l'entraînement pourrait permettre une amélioration de l'efficacité à l'effort tels que l'ingestion de suppléments énergétiques ou le suivi d'une diète spécifique. Dumke et coll. (2007) ont montré que l'utilisation de glucose comme supplément énergétique au cours d'un exercice de cyclisme d'endurance permet l'amélioration de l'économie à l'effort (EM + EC). L'ingestion de glucose pendant la compétition améliore la fonction métabolique en maintenant un niveau élevé de métabolisme des glucides tout au long de l'exercice. De même, Cole et coll. (2014) a montré que même une diète de 3 jours à 70% de glucose permet d'augmenter significativement l'EM des cyclistes par rapport à une diète normale ou une diète pauvre en glucides. Cette amélioration de l'EM n'est en relation ni avec un meilleur maintien du glucose dans le sang, ni avec une production moins importante du lactate, mais il se peut que le régime riche en glucose améliore la quantité d'eau stockée et que par conséquent le corps gère mieux le stress thermique produit par l'exercice (Cole et coll., 2014). Encore ici, des études restent à faire pour confirmer cette hypothèse et pour savoir si l'augmentation des réserves de glycogène dans les muscles à cause de la diète riche en glucide et de l'entraînement est l'une des causes qui améliorent l'EE.

L'amélioration de l'économie à l'effort ne s'arrête pas ici, par exemple les différents types d'entraînement en altitude, la morphologie de l'athlète, la température entraînements joueraient un rôle dans le processus de développement de ce paramètre (Foster et Lucia, 2007). En effet, ce n'est pas étonnant, car c'est un paramètre multidimensionnel.

Rapport-Gratuit.com

En 2014, Shaw et ses collaborateurs, ont publié une grosse recherche chez 172 coureurs d'endurance bien entraînés des deux sexes et ont montré que la mesure du coût énergétique (CE) afin évaluer l'économie à l'effort est plus valide que la mesure de la consommation d'oxygène. Il serait très intéressant d'essayer cette méthode avec les cyclistes et de la comparer avec la méthode de l'EM, car les deux se concentrent sur l'énergie produite par le corps au cours de l'exercice, mais en utilisant différentes formules et conceptions. Par contre, les résultats de Shaw et coll. (2014) restent limités en termes d'intensité de l'exercice, car les tests ont été faits à des intensités sous-maximales (<SL2). Il serait intéressant de vérifier si le CE garde sa fiabilité comme l'EM lors d'exercices plus intenses.

Lucia et coll. (2002) ont montré que l'économie du cycliste et l'efficacité mécanique sont inversement reliées au VO_2 max. En effet, les cyclistes qui présentent de faibles VO_2 max sont plus économes que ceux ou celles qui ont un VO_2 max plus élevé. C'est très difficile ou bien très rare de trouver une personne qui réunit ces deux qualités à la fois (Joyner et coll., 2011).

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

1.3. Le seuil lactique

1.3.1. Le concept du seuil lactique

Au cours d'un test maximal à charge progressive croissante, on remarque des fluctuations de l'évolution exponentielle de la lactatémie en deux points (Figure 1). Ces modifications sont considérées comme des seuils permettant de prédire la performance et utiles pour planifier les intensités d'entraînement et des exercices de rééducation (Faude et coll., 2009).

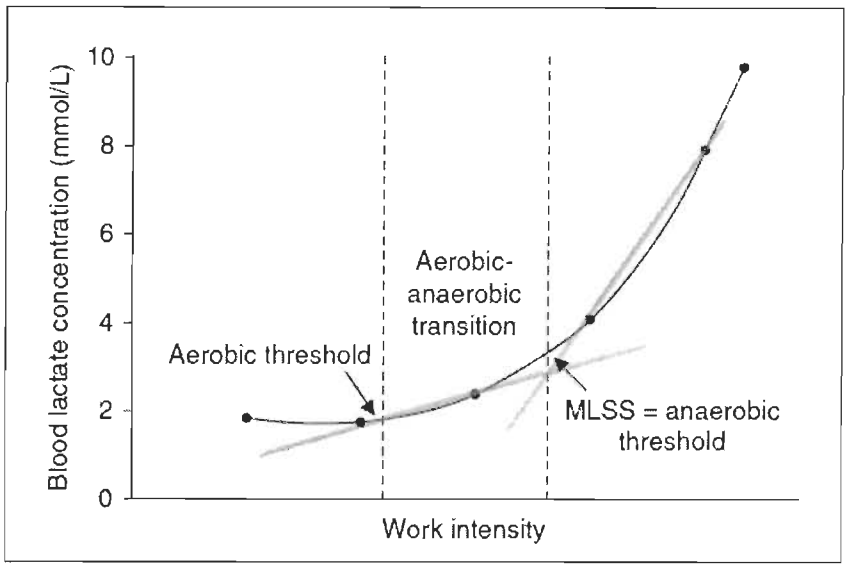


Figure 1 : Cinétique du lactate au cours d'un test de VO_2 max montrant l'existence de deux changements radicaux à différentes intensités (Faude et coll., 2009).

Depuis la découverte du seuil lactique, la définition de ce paramètre change d'une étude à l'autre en fonction de la méthode d'estimation utilisée et de l'interprétation physiologique adoptée. En effet, 25 termes ont été identifiés par Faude et coll. (2009) dans leur article synthèse. Depuis cette date, on n'a pas trouvé de nouveau terme. En effet, ces différentes interprétations du seuil lactique sont divisées en deux grandes catégories.

La première catégorie est le seuil aérobie qui pourrait être déterminé subjectivement par l'analyse visuelle de l'évolution de lactate ou quantitativement à travers neuf méthodes différentes. Subjectivement, le seuil aérobie est déterminé au moment où la lactatémie dépasse la valeur de repos (Figure 1). Les méthodes quantitatives regroupent deux différentes techniques, soit en utilisant le ratio de l'acide lactique sur l'intensité de travail ou le VO_2, soit en utilisant un incrément fixe par rapport

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

à la valeur de lactate de repos, qui varient entre 0,5 mM et 2 mM (Faude et coll., 2009).

La deuxième fluctuation de la lactatémie a donné lieu à plus de controverses sur le plan de la méthode d'identification et de la terminologie. Environ 12 protocoles ont été proposés pour déterminer le deuxième seuil, et 4 noms pour l'identifier (seuil lactique, seuil anaérobie, point de virage du lactate, ou seuil lactique 2). Le nom change d'un chercheur à l'autre, car les explications physiologiques ou les protocoles utilisés sont un peu différents. Le grand nombre de protocoles utilisés est à l'origine d'un grand nombre de facteurs qui affectent l'estimation du seuil lactique, tels le protocole du test de VO_2 max, l'appareillage de mesure du lactate, la nature du prélèvement fait (sang, plasma), l'endroit du prélèvement et les réserves musculaires en glycogène du participant (Faude et coll., 2009).

Puisqu'il y a beaucoup de diversité au niveau de la dénomination des seuils, on a choisi la méthode hiérarchique pour les identifier en donnant le nom du seuil lactique 1 (SL1) pour identifier la première fluctuation du lactate et le seuil lactique 2 (SL2) pour la seconde.

1.3.2. Les domaines d'utilisation du seuil aérobie et anaérobie

Malgré l'existence de ce grand débat, le SL2 est encore utilisé pour la prédiction de la performance et la planification des zones d'entraînement des athlètes, tandis que le SL1 est utilisé à des fins de remise en forme, de réadaptation cardiaque et de réadaptation des athlètes après une blessure (Faude et coll., 2009).

1.3.3. La physiologie des seuils lactiques

Le nom de seuil aérobie provient de la spécificité physiologique de ce paramètre, car il est démontré que, si un exercice est pratiqué à la puissance où le premier seuil apparaitra et aux puissances inférieures, presque la totalité de l'énergie provient du système métabolique aérobie (Faude et coll., 2009).

Bien que le SL2 soit souvent utilisé dans le domaine de la recherche en physiologie de la performance et de l'exercice, il n'est pas encore bien clair. En effet, l'explication physiologique de ce paramètre se dispute entre deux interprétations. La controverse se focalise au niveau de la notion de transition du métabolisme aérobie - anaérobie. La première définition, la plus ancienne et la plus utilisée, explique le SL2 comme un point d'inflection brutal du métabolisme aérobie au métabolisme anaérobie. L'un des plus forts arguments qui appuient cette interprétation est qu'un exercice constant au-dessus du SL2 provoque une augmentation prononcée de l'acide lactique à cause du taux de production qui devient supérieur au taux d'élimination. Ceci est associé à une augmentation rapide de la ventilation respiratoire (VE) et une difficulté de maintenir la puissance de travail lors de l'exercice, ce qui provoque une augmentation de la perception de stress et accélère la sensation de la fatigue. Ces effets délétères seraient dus à l'acidose et à la déplétion des réserves de glycogène intramusculaire. Par contre, un exercice au-dessous du SL2 permet de s'adapter et de créer un plateau dans un délai de 3 à 6 min, selon le niveau de l'entraînement du sujet (Jones et Carter, 2000; Wilmore et Costill, 2003).

L'interprétation opposée est celle de Myres et coll. (1997), qui est basée sur l'analyse métabolique des systèmes énergétiques en cours d'exercice. En effet, ces

auteurs affirment que le processus de transition du système aérobie au système anaérobie est continu, graduel, tout au long de l'augmentation de l'intensité de l'exercice, et qu'il n'y a pas de changement abrupt. Donc, ceci discréditerait même l'existence de seuils (Faude et coll., 2009).

Il est difficile de rejeter l'une des deux explications physiologiques du SL2 au complet, car les deux se basent sur des recherches valides et assez rigoureuses, mais on pourra trouver une explication logique rassemblant les deux approches. En effet, il est démontré, grâce à des mesures directes et indirectes, que le métabolisme aérobie contribue d'une manière significative dès les premières secondes de la performance, comme par exemple lors d'un sprint de 6 s (Gaitanos et coll., 1993; Hachana et coll., 2012). Donc, dans tout type d'exercice, les deux systèmes métaboliques travaillent de manière complémentaire dès le début, mais sous proportions et latences selon l'intensité de l'exercice, sa durée, voire son mode (Joyner et Coyle, 2008; Wilmore et Costill, 2003). Dans presque tous les ouvrages qui traitent de la physiologie de l'effort, le SL2 est défini comme la capacité du métabolisme aérobie. Ainsi, il diffère d'un individu à l'autre et peut atteindre des valeurs très élevées, soit 80% à 90% du VO_2max, chez les athlètes d'endurance d'élite (Padilla et coll., 1999).

Donc, le SL2 est un paramètre physiologique qui représenterait un seuil métabolique auquel la capacité aérobie devient incapable de soutenir de façon prédominante l'exercice et par conséquent la contribution croissante du métabolisme anaérobie rend l'exercice de plus en plus insupportable avec l'augmentation de l'intensité.

Afin d'appuyer cette définition du SL2, il faut des analyses plus approfondies au

niveau moléculaire au cours d'exercices continus à différentes intensités. À notre connaissance, la spectroscopie par résonnance magnétique P31 est la technique appropriée pour ce type de recherche, car elle est non invasive et elle permet de prendre des mesures au cours du déroulement de la performance, au contraire de la biopsie musculaire.

1.3.4. La meilleure méthode d'identification du SL2

Malgré que le SL2 reste un concept encore ambigu, il nous intéresse et paraît être le plus pertinent pour notre recherche. Nous avons tenté d'analyser le concept opératoire du SL2 en le divisant en trois grandes catégories.

La première catégorie opératoire inclut le SL2 qu'on détermine par différentes méthodes d'analyse de la cinétique du lactate ou de la ventilation au cours du test de VO_2 max. La deuxième catégorie est une valeur de lactate fixe à 4 mM appelée OBLA «Onset of Blood Lactate Accumulation». La troisième correspond à l'état stable maximal de lactatémie (MLSS), qui représente le niveau de lactate le plus élevé chez l'individu pouvant être maintenu pendant 30 min sans augmentation de lactatémie de plus de 1 mM durant les dernières 20 min.

Le MLSS semble d'être la méthode la plus fiable, car un exercice à l'intensité associée au MLSS permet d'enregistrer des plateaux au niveau du lactate, du VO_2, de la VCO_2, du QR, de la VE, de la concentration du bicarbonate, de la réponse hormonale (noradrénaline, adrénaline) et de l'activité électromyographique des muscles actifs jusqu'à la fin de l'exercice (Baron et coll., 2003; Faude et coll., 2009; Jones et Carter, 2000), mais pas pour tous les paramètres physiologiques comme la Fc, le pyruvate, l'ammoniaque, la pression partielle du CO_2 dans le sang (Baron et coll.,

2003; Lajoie et coll., 2000).

Sur le plan pratique, le MLSS permet de prédire la performance en endurance des coureurs et des cyclistes d'une manière stable sur des distances s'étalant de 5 à 40 km (r= 0,84 à 0,92) (Faude et coll., 2009).

Le problème associé à la mesure du MLSS est la difficulté, le coût et la durée de son protocole de détermination. Ainsi, l'un des objectifs de plusieurs recherches est d'identifier le MLSS en une seule séance (Lajoie et coll., 2000). Onze études repérées dans l'article de synthèse de Faude et coll. (2009) ont comparé le MLSS à deux autres concepts (« SL2, SV2 » et OBLA). Nous n'avons pas recensé d'autre recherche comparative publiée sur ce sujet depuis 2009. Comme on va voir dans les prochaine lignes, la méthode de détermination de la puissance ou de la vitesse associée à 4 mM au cours du test PAM ou VAM semble être la plus prometteuse car elle permet d'estimer le MLSS. En utilisant les résultats de trois études qui réalisent trois différents tests de VO_2max différant quant à la durée des paliers, Faude et coll. (2009) a montré que des paliers de 5 min sont les meilleurs afin d'estimer le MLSS selon le seuil fixe à 4 mM, avec un biais moyen d'erreur de 9%. Avec des paliers plus courts, le biais moyen d'erreur varie entre 8 et 27%. Cette étude a été réalisée avec des groupes de différentes spécialités (16 coureurs et 22 cyclistes). Lajoie et coll. (2000) ont réalisé leur étude sur 9 cyclistes bien entraînés et ont montré qu'avec des paliers de 8 min et 30 W d'incrémentation, la puissance associée à 4 mM est similaire à celle du MLSS (281,7 ± 49,9 vs 276,67 ± 49,0 W). De plus, un exercice constant à la puissance associée à 4 mM pour chaque sujet montre une stabilité au niveau du lactate, du VO_2, de la VE et de la RPE durant les 30 premières minutes de l'exercice.

1.3.5. Le SL2 et la performance en endurance

Pour les coureurs à pied, le SL2 est corrélé linéairement avec la performance en endurance sur des distances de 4 à 40 km. De ce fait, plus la distance augmente, plus le pouvoir de prédiction de la performance par le SL2 augmente (0,8 à 16,1km : r = 0,43 à 0,93; 19,3 à 42,2km : r = 0,68 à 0,98). Mais, pour les cyclistes de route, les données ne suivent pas la même tendance puisque la corrélation est plus forte avec la performance de 4 à 20km qu'avec celle de 4 à 40 km (r=0,82 à 0,90 vs r= 0,60 à 0,75) (Faude et coll., 2009). Cette différence est peut-être en relation avec le mode de l'exercice pratiqué, mais une recherche qui utilise des triathloniens dans les deux types de performance peut vérifier cette hypothèse.

Par le biais des moteurs de recherche scientifique (Google scholar, Medline, SportDiscus), nous avons trouvé seulement quatre articles dans lesquels les cyclistes grimpeurs ont été étudiés, dont deux concernent les caractéristiques morphologiques et physiologiques des différents types de cyclistes, y compris les grimpeurs (Impellizzeri et coll., 2008; Padilla et coll., 1999), un article en biomécanique (Bertucci et coll., 2005), et un dernier qui étudie la relation des paramètres aérobies avec la performance en ascension (Heil et coll., 2001). Celui-ci a montré que, sur une performance de 12,5 km avec un total d'élévation de 343 m, le SL2 montre une forte corrélation avec la performance en termes absolu et relatif (0,86 vs 0,96).

L'étude d'Impellizzeri et coll. (2008) a montré que le profil anthropométrique des cyclistes de route grimpeurs et de montagne est semblable; sur le plan physiologique, 75% des paramètres aérobies absolus et relatifs sont semblables. Pour cela, on a eu recours aux trois études sur le vélo de montagne qu'on a trouvées, pour avoir une idée

sur la relation de l'OBLA et de la performance en endurance sur des pistes de caractéristiques variées. Impellizzeri et coll. (2005a), dans leur première étude avec 13 cyclistes de niveau régional, national et international, ont montré que le SL2 et l'OBLA étaient significativement corrélés avec la performance sur 31 km de vélo de montagne à une altitude de 1260 m ($r = -0,73$, et $r = -0,71$; $p<0,01$). Mais, en exprimant le SL2 et le OBLA par rapport au poids du corps, la corrélation de la performance devient plus forte et plus significative ($r = -0,90$ et $r = -0,94$; $p<0,001$).

La recherche de Gregory et coll. (2007) chez 11 cyclistes de haut niveau sur 15,5 km de piste montagneuse a montré que le SL2 n'est corrélé avec la performance que lorsque les résultats sont exprimés relativementpar rapport au poids du corps ($r = 0,50$ vs $0,75$; $p<0,05$). Ces résultats sont en accord avec ceux d'Impellizzeri et coll. (2005a), où le SL2 apparaît davantage corrélé avec la performance sur 31 km de vélo de montagne que par sa valeur relative ($r = 0,78$; $p<0,05$ vs $r = 0,50$).

Dans la deuxième recherche d'Impellizzeri et coll. (2005b) réalisée sur 15 cyclistes d'élite, la performance sur 33,6 km à une altitude de 1362 m n'était corrélée ni avec la consommation d'oxygène au SL2 ni avec la puissance associée au SL2 ($r = -0,01$ et $r = -0,17$). Les valeurs de ces deux dernières corrélations ont augmenté quand elles ont été exprimées en valeurs relatives, mais sans pour autant devenir significatives ($r = -0,38$ et $r = -0,37$).

La contradiction entre les deux recherches d'Impellizzeri et coll. (2005a et b) est expliquée par l'homogénéité du groupe expérimental dans la deuxième recherche, où la différence de performance sur 33,6 km n'était que de 6 min entre le meilleur et le moins performant des cyclistes, tandis que, dans la première étude sur 31 km, la

différence était 26 min (Impellizzeri et coll., 2005b). Ces trois recherches tout comme celle avec les cyclistes grimpeurs nous montrent que la composition corporelle des cyclistes de montagne est très importante pour leur performance. En conclusion, le poids du cycliste influence fortement la performance sur des terrains variés, où plus la puissance relative associée au paramètre augmente, plus la performance s'améliore (Faude et coll., 2009; Impellizzeri et coll., 2005a).

La vitesse de 12,5 km à 2,5% de pente comme performance utilisée par Heil et coll. (2001) n'est pas assez représentative de la réalité au cours des compétitions officielles. Il serait intéressant de faire plus de recherches avec des distances plus longues et des pentes plus élevées afin d'avoir une meilleure idée des paramètres qui influencent la performance des cyclistes en montée et d'en élaborer des modèles prédictifs.

Cependant, pour les compétitions de cyclisme sur des pistes variées, la puissance aérobie maximale PAM semble être plus fiable que les autres paramètres aérobies pour prédire la performance (Gregory et coll., 2007; Heil et coll., 2001; Impellizzeri et coll., 2005a).

1.4. La puissance aérobie maximale

La puissance aérobie maximale est la puissance la plus élevée atteinte durant un test maximal à charge progressive croissante. C'est le pic de la puissance pouvant être développée par les muscles lorsque le métabolisme aérobie est à sa puissance maximale, ainsi elle est nommée puissance aérobie maximale « PAM » ou vitesse

Rapport-Gratuit.com

aérobie maximale « VAM » pour la course à pied (Faria et coll., 2005; Wilmore et Costill, 2002). Bien que la PAM est reliée linéairement au VO_2 max ($r = 0,97$; $p<0,0001$) (Hawley et Noakes, 1992), le VO_2 max n'est pas le seul facteur qui affecte la puissance aérobie maximale.

Le suivi pendant 5 ans d'athlètes olympiques montre que le VO_2 max peut diminuer, mais la VAM s'accroît grâce à l'augmentation de l'économie de la course et du pourcentage du SL2 par rapport au VO_2 max (Jones, 1998). De même, en cyclisme, Sunde et coll. (2010) ont montré qu'après 8 semaines d'entraînement les cyclistes de haut niveau ont augmenté significativement leur PAM, mais leur VO_2 max n'a pas changé. En effet, cette évolution au niveau de la PAM est expliquée par l'augmentation de l'économie à l'effort. De plus, Jones et Carter (2000) considèrent que la PAM (ou la VAM) n'est pas seulement influencée par les facteurs aérobies, mais aussi par les compétences anaérobies du sujet, comme la puissance musculaire et les compétences neuromusculaires à développer une grande vitesse.

Donc, puisque la PAM est la puissance aérobie maximal du corps humain en termes de watts développés, il semble que tous les paramètres aérobies sous-maximaux et maximaux participent au produit final de ce paramètre. Une analyse corrélationnelle conjointe de tous les paramètres aérobies nous permettrait de vérifier encore cette hypothèse.

En comparant la PAM des différents types de cyclistes, on trouve que les spécialistes en route sur le plat ont la PAM absolue la plus élevée comparativement aux spécialistes en parcours ascendant. Si par contre on l'exprime la PAM en valeur relative par rapport au poids, les cyclistes grimpeurs présentent une PAM

significativement plus élevée (Padilla et coll., 1999). Cette intervention est attribuable au poids corporel des cyclistes grimpeurs, significativement moins important que chez les autres spécialistes tels que de montagne, de route et de contre-la-montre (Impellizzeri et coll., 2008; Padilla et coll., 1999).

Hawley et Noakes (1992) ont montré que la corrélation de la PAM avec le temps de 20 km plat chez 19 cyclistes des deux sexes diminue de -0,91 à -0,68 si l'on passe de la PAM absolue à la PAM relative. Pourtant, sur une performance en ascension Heil et coll. (2001) ont montré que la PAM absolue est moins corrélée avec la performance en endurance sur 12,5 km (0,71 vs 0,97). Donc la PAM absolu est un meilleur prédicteur sur les parcours plat, mais si le parcours est donc la PAM relative est le meilleur prédicteur.

Ces résultats nous montrent que la PAM exprimée en valeur relative de même que le VO_2max, et le SL2 sont plus appropriés que les paramètres absolus pour expliquer ou prédire la performance des cyclistes en endurance sur un parcours ascendant, alors que, pour les performances sur des routes planes, il est préférable d'utiliser les paramètres en valeurs absolues.

1.5. La cinétique du VO_2

Au cours des exercices à intensité inférieure au SL2, le VO_2 augmente puis se stabilise après 2 à 3 min, démontrant ainsi un plateau si l'exercice se prolonge. Ceci démontre une adaptation entre la demande énergétique de l'exercice et le débit de production de l'énergie (Gaesser et Poole, 1996; Jones et Carter, 2000). Si l'exercice

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

est fait à une intensité supérieure au SL2 mais ne dépasse pas la PC, un autre plateau plus retardé (10min) de VO_2 est créé (Gaesser et Poole, 1996; Jones et coll., 2010). Lorsque la puissance de l'exercice dépasse la PC, le VO_2 continue à augmenter jusqu'à l'atteinte du VO_2 max, amenant une dérive de la consommation d'oxygène. Suite à ces analyses gazeuses et la réponse de lactate pour différentes intensités d'exercice, les chercheurs ont identifié les trois seuils de l'exercice : le SL2 pour délimiter les exercices à intensité moyenne des exercices intenses, la PC pour repérer les exercices intenses des exercices très intenses et le SL2 pour délimiter les exercices intenses des exercices d'intensité moyenne des exercices intenses (Gaesser et Poole, 1996; Jones et Carter, 2000; Jones et coll., 2010) (Figure 2).

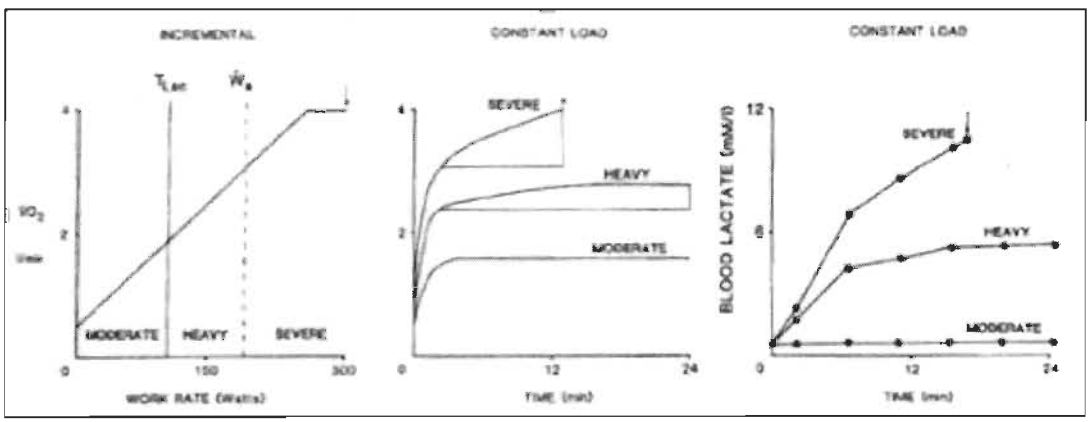


Figure 2 : Détermination de différentes zones d'exercice par l'analyse de l'oxygène et de l'acide lactique (Gaesser et Poole, 1996)

Cette dérive d'oxygène entre la quantité consommée à la PC et l'atteinte du VO_2 max est appelée la composante lente du VO_2. Au cours des exercices constants à une intensité très élevée, la composante lente du VO_2 est enregistrée entre la 3ième et la 6ième minute (Gaesser et Poole, 1996; Jones et Carter, 2000; Xu et Rhodes, 1999).

Cinq facteurs semblent responsables des composantes lentes de VO_2, à savoir les augmentations du coût ventilatoire, de l'acide lactique, de la température, du recrutement des fibres rapides de type IIx et de la concentration plasmatique des catécholamines (Xu et Rhodes, 1999).

Lucia et coll. (2002) ont comparé des cyclistes élites et amateurs et ont vérifié que la cinétique du VO_2 est un indicateur du potentiel aérobie et de l'adaptation à l'entraînement des athlètes d'endurance. Ceci est logique, car la cinétique de VO_2 est influencée par le VO_2 max, l'EE, le seuil lactique, et la PC, donc tout développement par l'entraînement dans l'un de ces paramètres influencera directement la cinétique de VO_2.

Il n'est donc pas surprenant que la cinétique de VO_2 permette de prédire la performance (Burnley et Jones, 2007). En effet, plus le VO_2 max du sujet est élevé, plus sa cinétique de VO_2 est rapide en début d'exercice. Ceci est très important, car avec une cinétique de VO_2 rapide, la consommation d'oxygène de l'athlète s'adapte rapidement à l'intensité de l'exercice, ce qui diminue le déficit d'oxygène et par conséquent diminue la quantité de lactate produite au début de l'exercice. En d'autres mots, une cinétique de VO_2 rapide permet d'avoir une réponse cellulaire plus tôt pendant l'épreuve, ce qui donne plus de temps aux cellules pour maintenir l'exercice à la phase finale (Jones et Carter, 2000).

Beaucoup d'études ont essayé d'identifier les facteurs physiologiques clés qui contrôlent la cinétique du VO_2 et les moyens qui permettent de l'améliorer. En effet, sur le plan physiologique, il y a une différence entre les athlètes entraînés et non entraînés. Pour les athlètes non entraînés, la cinétique de VO_2 dépend du taux de disponibilité de

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

l'O_2 au niveau des capillaires sanguins des muscles recrutés et le taux des fibres lentes disponibles (Bailey et coll., 2009; Cleland et coll., 2012; Endo et coll., 2004). Pourtant, l'adaptation plus rapide du débit cardiaque chez les athlètes entraînés s'ajoute aux facteurs qui accélèrent la cinétique du VO_2 (DeLorey et coll., 2007; Faisal et coll., 2009).

Pour les athlètes non entraînés, un échauffement intense (> SL2) est plus efficace que l'échauffement à une intensité moyenne pour améliorer leur cinétique de VO_2 et améliorer la performance subséquente (Bailey et coll., 2009; Burnley et coll., 2011). Avec les athlètes entraînés, l'échauffement avant la compétition est meilleur que de ne pas faire d'échauffement sur le plan de l'adaptation physiologique et de la performance, mais l'intensité de l'échauffement n'a pas d'influence (Faisal et coll., 2009; Hajoglou et coll., 2005).

1.6. La ventilation

Faria et coll. (2005a) ont considéré que la ventilation de l'athlète au cours de l'épreuve est l'un des paramètres qui influencent la performance en endurance. En effet, plus le sujet est entraîné, plus sa capacité de contrôler sa ventilation tout au long de la compétition est meilleure, car à une intensité élevée les athlètes professionnels ont montré qu'ils sont capables de maintenir un volume courant élevé en augmentant leur fréquence ventilatoire, ce qui inhibe l'apparition de l'hypoxémie.

Pendant l'épreuve compétitive, la ventilation de l'athlète augmente systématiquement avec l'augmentation de l'intensité du travail, ce qui permet aux muscles actifs d'avoir du sang oxygéné d'une manière régulière tout au long de l'épreuve, sans perturbations. Mais, à des intensités maximales de longue durée, le

taux d'utilisation de l'oxygène par les muscles devient très élevé, ce qui provoque souvent une diminution de la pression artérielle en O_2 et avec elle du taux de saturation de l'hémoglobine en oxygène. Pourtant, une bonne ventilation peut compenser cette dette en oxygène, sachant que seulement 50 à 60% des athlètes de haut niveau peuvent éviter l'hypoxémie induite par l'exercice (Billat, 2003; Wilmore et Costill, 2002). Le coût ventilatoire d'un tel effort au cours d'un exercice très intense pourrait avoisiner les 15 % du VO_2 max (Faria et coll., 2005a).

1.7. Le métabolisme anaérobie

Dans le modèle physiologique le plus récent de la performance en endurance, Coyle et Joyner (2008) considèrent que le VO_2 et le SL2 déterminent la performance du métabolisme aérobie selon la durée de l'épreuve. De plus, la capacité anaérobie s'ajoute à l'énergie produite par les voies aérobies afin de déterminer le taux maximal de l'énergie pouvant être maintenu tout au long de la performance. Enfin, l'économie à l'effort transforme le taux d'énergie chimique produite en énergie mécanique, laquelle détermine à son tour la performance de l'athlète.

1.7.1. Définition du métabolisme anaérobie :

L'énergie anaérobie est une énergie produite sans besoin de recourir aux processus oxydatifs. Cette énergie se trouve dans les muscles sous forme de réserves d'oxygène au niveau des myoglobines, de l'adénosine triphosphate et de la créatine phosphate (ATP-CP) et par la mise en œuvre de la glycolyse anaérobie (Ferguson et coll., 2010).

La puissance ou la capacité du métabolisme anaérobie au cours d'une activité

réalisée par tout le corps est très difficile à mesurer. L'étude directe du métabolisme anaérobie reste limitée avec des appareillages ne permettant que des mouvements restreints unidirectionnels sollicitant un seul groupe musculaire, habituellement l'extension du genou ou du coude (Jones et coll., 2008). La deuxième limite de cette technique (Spectroscopie par Résonnance Magnétique P-31) est le coût et la difficulté d'utilisation du matériel qui nous permet de mesurer directement le métabolisme anaérobie.

De ce fait, les méthodes utilisées pour cette mesure sont souvent indirectes et déduites. La puissance pic développée en Watts au cours d'un exercice de cyclisme court supramaximal est considérée comme le niveau de la puissance du système anaérobie (Baron, 2001; Bar-Or, 1987). Pourtant, l'estimation de la capacité anaérobie peut se faire par le calcul du déficit d'oxygène maximal, ou l'efficacité brute et l'utilisation ou le concept de la puissance critique (Noordhof et coll., 2013).

1.7.2. Le métabolisme anaérobie et la performance en endurance

Joyner et Coyle (2008) ont considéré que le métabolisme anaérobie est l'un des éléments importants de la performance en endurance, surtout si la durée de la performance ne dépasse pas les 30 min, la contribution de ce dernier pouvant atteindre de 10 à 20%. L'interprétation de Joyner et Coyle se base principalement sur la notion que tous les systèmes énergétiques sont sollicités dans n'importe quelle performance, mais en proportions variables selon l'intensité et la durée de l'exercice. Néanmoins, cet article de synthèse ne montre pas si la contribution du métabolisme anaérobie est significative au cours de la performance en endurance. En outre, est-ce que l'entraînement du métabolisme anaérobie est un facteur favorable ou défavorable à la

performance en endurance?

Pour répondre à ces questions, il est intéressant de vérifier la littérature sur la course à pied et du cyclisme. Le choix d'ajouter les études de course à pied était nécessaire, car en cyclisme il n'y a guère d'études qui mettent en relation le métabolisme anaérobie et la performance en endurance. De même, les articles sur la course à pied nous permettent de discuter l'hypothèse de Joyner et Coyle, (2008), qui était basée uniquement sur ce sport.

En effet, sept recherches sur la course à pied ont étudié la relation directe entre le métabolisme anaérobie et la performance en endurance entre 5 et 10 km (Baumann et coll., 2012; Bulbulian et coll., 1986; Houmard et coll., 1991; Nemmula et coll., 2006; Paavolainen et coll., 1999; Sinnett et coll., 2001; Tharp et coll., 1991).

La puissance anaérobie estimée par la vitesse moyenne ou le temps sur 50m (Baumann et coll., 2012; Sinnett et coll., 2001; Tharp et coll., 1991) ou par la vitesse pic sur 20 m (Nummela et coll., 2006; Paavolainen et coll., 1999), ou par la puissance pic calculée avec le test de Margaria et la détente verticale (Houmard et coll., 1991) a montré des corrélations positives et significatives avec la performance en endurance.

De même, la capacité anaérobie estimée soit par le concept de la puissance critique (PC) (Bulbulian et coll., 1986) ou le test de la vitesse aérobie maximale (VMRT) (Baumann et coll., 2012; Nummela et coll., 2006; Paavolainen et coll., 1999) ou le temps réalisé sur 300m (Sinnett et coll., 2001) a montré des corrélations positives avec la performance en endurance pour des distances entre 5 et 10 km. Dans ces études, des analyses de régression multiple ont montré que même si la capacité et la puissance anaérobies sont fortement corrélées avec la performance en endurance, la

capacité anaérobie influence aussi significativement la performance en endurance (Baumann et coll., 2012; Bulbulian et coll., 1986; Nummela et coll., 2006). En effet, sur une distance de 5 km sur un parcours plat, la capacité anaérobie (MART) explique 31% de la variation de la vitesse moyenne (Baumann et coll., 2012). Pourtant, sur une distance de 8,5 km sur une piste de cross-country la capacité anaérobie (W') explique 58% de la performance (Bulbulian et coll., 1986). La grande différence de contribution de la capacité anaérobie entre les deux performances semblait en relation avec les caractéristiques du terrain et le type de test utilisé pour estimer la capacité anaérobie. En effet, la méthode de la PC est plus valide que le MART, car il faut noter que l'énergie anaérobie contribue de 64 à 80% à la performance du test MART, le reste étant expliqué par les caractéristiques neuromusculaires (Baumann et coll., 2012; Nummela et coll., 2006). L'estimation de la capacité anaérobie par la méthode de la PC en course à pied est plus fiable, car le W', le paramètre qui reflète la capacité anaérobie, représente seulement le travail réalisé par le métabolisme anaérobie au cours de l'exercice. Par conséquent l'interprétation des analyses statistiques sera plus fidèle.

Il est intéressant de vérifier si la capacité anaérobie est encore importante pour les athlètes qui font des distances supérieures à 10 km. Car une recherche réalisée sur des distances de demi-marathon et de marathon nous permettrait soit de généraliser l'hypothèse de Joyner et Coyle, (2008), soit de mieux comprendre la stratégie de l'utilisation des réserves d'énergie anaérobies au cours des courses de longue distance, en faisant une analyse séquentielle de la course (Temps ou vitesse moyenne de chaque 5 km).

Pour les épreuves de cyclisme de route plate et ascendante, aucune recherche à notre connaissance n'a été réalisée sur des performances de longue durée. Par contre, avec les cyclistes de montagne, trois recherches nous donnent un aperçu permettant d'émettre une conclusion. Nous allons examiner les résultats et les critiques de ces recherches, car l'épreuve de cyclisme de montagne exige probablement plus de contribution du métabolisme anaérobie que le cyclisme de route.

La première recherche est celle de Baron (2001), dans laquelle il a montré que les cyclistes de montagne développent une puissance pic relative significativement plus élevée que des sujets actifs durant des exercices de sprint de 10s (CON13,3±1,4 vs. CYC 14,9±1,1 W/kg^{-1}; $p<0,01$), et aussi que les cyclistes de montagne présentent un indice de puissance maximale plus élevée significativement par rapport aux sujets actifs (CON 32,0±4,5 c. 38,0±3,9; $p<0,01$).

L'indice de la puissance maximale est la PAM divisée par la puissance pic multipliée par 100 (équation 2) :

IPmax = [(PAM / PP) x 100] <u>(Équation 2)</u>

Cet indice nous donne des informations sur la proportion de puissance de l'énergie aérobie par rapport à l'énergie anaérobie sollicitée chez les sujets au cours de l'exercice, et par conséquent il nous permet de savoir sur quel système énergétique nous devons nous concentrer au cours de l'entraînement des cyclistes. En effet, si l'IPmax est inférieur à 40 %, l'athlète doit développer davantage sa puissance aérobie, mais s'il est supérieur à 45 % l'athlète doit développer sa puissance anaérobie. Donc la conclusion de Baron (2001) montre que le système anaérobie est important autant que le système aérobie pour les cyclistes d'endurance.

Rapport-Gratuit.com

D'autres évidences indirectes mentionnées par Impellizzeri et coll. (2007) montrent que les cyclistes de montagne ont besoin d'une bonne capacité anaérobie pour gagner les compétitions. Ces cyclistes essaient de prendre un bon emplacement dès le début de la course, ce qui engendre l'atteinte des fréquences cardiaques proches de la $F_C$max et un niveau de lactate élevé au premier tour (8,1 – 11 $mM.l^{-1}$).

La deuxième recherche est celle de Costa et Fernando (2008), dans laquelle, pour 6 athlètes élite, on n'a pas trouvé de corrélation entre la performance de vélo de montagne et les paramètres dérivés d'un test de Wingate. En effet, les auteurs ont indiqué que les résultats négatifs sont peut-être expliqués par le type de groupe choisi, très homogène, et le nombre de participants. À l'appui de leur argument, ils ont montré que, parmi tous les paramètres physiologiques aérobies mesurés, seule la PAM relative se trouve corrélée avec la performance.

La même chose a été observée par Inoue et coll. (2012) chez un groupe plus hétérogène de 13 cyclistes de niveau régional, les paramètres du test de Wingate ressortant non corrélés avec la performance en endurance réalisée sur une piste.

Les deux recherches précédentes suggèrent de conclure que la puissance anaérobie n'affecte pas la performance en endurance des cyclistes de montagne, mais on ne peut pas l'affirmer pour la capacité anaérobie. En effet, l'utilisation de la puissance moyenne développée au cours du test de Wingate n'est pas valide pour estimer la capacité anaérobie. Bar-Or (1987) a montré dans son article de synthèse qu'un effort de 30 s n'est pas suffisant pour estimer le métabolisme anaérobie total. Gastin et Lawson (1994) ont vérifié la conclusion de Bar-Or (1987) en montrant que seulement 82 ± 2% de la capacité anaérobie est utilisée durant un effort supramaximal

de 30s sur un ergocycle. De plus, la capacité anaérobie utilisée même à 45s est significativement inférieure à celle mesurée à 60s. Pour estimer la capacité anaérobie avec un test explosif supramaximal comme le Wingate, il faut que la durée du test dépasse les 75s.

Pour vérifier la contribution du métabolisme anaérobie durant la performance en endurance des cyclistes de montagne il faut utiliser des tests d'évaluation validés et reproductibles.

En diminuant la distance parcourue à 1 et 6 km, Richard Davison et coll. (2000) ont montré que la puissance moyenne du test de Wingate de 30s, qui représente normalement la capacité anaérobie, est significativement corrélée avec la performance de 1 km à une pente de 12% et 6 km à une pente de 6%. Il est vrai que la réalisation des tests de performance avec vélo sur tapis roulant permet de mieux reproduire la performance réelle puisque les cyclistes utilisent leur vélo personnel. Mais une pente constante de 6 km n'est pas représentative des pistes de compétition. En outre, le contrôle de la vitesse du tapis par le jugement du cycliste en cours de performance élimine les effets de la variabilité de vitesse naturelle et de rythme qui adviennent au cours d'une performance réelle.

La contribution du métabolisme anaérobie à la performance en endurance n'est pas encore claire. D'une part, le test choisi (Wingate 30s) pour mesurer le métabolisme anaérobie n'est pas valide pour mesurer la capacité anaérobie (Bar-Or, 1987; Gastin et Lawson, 1994). D'autre part, la distance étudiée sur un parcours ascendant est trop courte (Richard Davison et coll., 2000) par rapport à la performance en endurance des compétitions (1 et 6 km vs 12 à 20 km).

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Au niveau des performances en endurance des cyclistes sur piste plate, aucune recherche n'a étudié l'importance de la capacité anaérobie. Mais des évidences indirectes suggèrent l'influence du métabolisme anaérobie pour les cyclistes de route. Sunde et coll. (2010) ont réfuté l'idée que les cyclistes d'endurance doivent se concentrer seulement sur l'entraînement de longues distances pour développer leur performance, car ils ont montré que l'addition de la musculation pendant 8 semaines au programme habituel permet d'améliorer significativement leur performance en endurance. Impellizzeri et coll. (2007) affirment que «la puissance et la capacité anaérobies peuvent être importantes pour les demandes physiologiques des compétitions de cyclisme de montagne et de route».

1.8. Conclusion :

Contrairement à ce qui est connu depuis longtemps, il semble que le métabolisme anaérobie comme le métabolisme aérobie contribuent significativement et de manière favorable à la performance en endurance.

La consommation maximale d'oxygène (VO_2max), le seuil aérobie, le seuil anaérobie (SL2), et l'économie à l'effort (EE) sont les principaux paramètres aérobies qui expliquent la performance en endurance (Faria et coll., 2005; Impellizzeri et coll., 2007; Jones et Carter, 2000; Joyner et Coyle, 2008). En effet, le VO_2max est un paramètre multidimensionnel qui représente le travail maximal des systèmes respiratoire, cardiovasculaire et neuromusculaire. De même, le SL1, le SL2 et l'EE sont les résultats du travail des mêmes systèmes physiologiques, mais ils représentent différentes qualités physiques.

La cinétique du VO_2 est un paramètre pouvant être mesuré seulement dans les trois premières minutes de l'exercice. Pour cette raison, on ne peut pas l'utiliser pour expliquer ou prédire la performance en endurance. Pourtant, c'est un bon indicateur de l'état d'entraînabilité de l'athlète (Burnley et Jones, 2007; Lucia et coll., 2002). De même, la ventilation apparaît comme un paramètre limitatif et non explicatif de la performance en endurance (Faria et coll., 2005a).

La PAM n'est pas une simple représentation de la puissance maximale du système aérobie, mais c'est le produit du travail maximal de tous les paramètres aérobies maximaux et sous-maximaux. Il est très intéressant d'ajouter ce paramètre aux facteurs prédicteurs de la performance, car il représente le travail physiologique-mécanique de l'organisme et l'effet d'interaction entre les différents paramètres. Une analyse inter-corrélationnelle de tous les paramètres aérobie et anaérobie pourrait permettre de savoir si la PAM est aussi influencée par la performance anaérobie chez l'être humain.

Il est démontré que le métabolisme anaérobie en termes de puissance et de capacité contribue significativement d'une manière favorable à la performance en endurance en course à pied (Baumann et coll., 2012; Bulbulian et coll., 1986, Houmard et coll., 1991; Nemmula et coll., 2006; Paavolainen et coll., 1999; Sinnett et coll., 2001; Tharp et coll., 1991). Il n'y a pas encore d'études scientifiques sur le cyclisme qui confirment les résultats obtenus en course à pied, à cause du manque de recherches sur le sujet sur des longues distances (Davidson et coll., 1999; Heil et coll., 2001) et de l'utilisation de tests non validés (Costa et Fernando, 2008; Davidson et coll., 1999; Heil et coll., 2001). De plus, dans les deux types de sport, il n'y a pas de recherches qui

étudient l'influence du métabolisme anaérobie sur la performance en endurance de plus de 30 min (10 km en course et 16 km en cyclisme).

Notre premier et principal objectif sera de caractériser la relation du métabolisme anaérobie avec la performance en endurance de plus de 30 min chez des cyclistes de route soumis à deux épreuves, soit un parcours plat et un parcours ascendant.

Des études utilisant des tests d'évaluation validés dans le domaine de cyclisme sous différentes spécialités et sur des longues distances comparables à celles des compétitions nous permettraient de mettre sur pied un modèle général de la performance en cyclisme et du rôle du métabolisme anaérobie dans la performance en endurance.

L'utilisation du VO_2max, et des paramètres SL1, SL2, EE, W', et PP pour expliquer la performance ne nous permet pas de comprendre le fonctionnement d'un organe spécifique au cours de la performance réalisée. Elle permet néanmoins de connaître les qualités physiques nécessaires pour bien réussir la performance exigée. À notre connaissance, la durée ou la distance de la performance sont les principaux facteurs qui déterminent les principaux paramètres physiologiques mis en œuvre au cours de la performance (Faude et coll., 2009; Joyner et Coyle, 2008). La performance physique est multidimensionnelle, pour cela, il est possible que d'autres facteurs que la distance ou la durée de l'effort influencent les qualités physiques nécessaires pour la réussite.

Dans les grandes compétitions de cyclisme comme le Tour de France ou le Championnat du monde, les cyclistes confrontent des étapes variées dans lesquelles

ils sont obligés de rouler de longues distances sur des pistes plates et même en altitude, et sur des pistes ascendantes. Pour cela, notre deuxième objectif sert à vérifier l'effet du changement des caractéristiques du terrain de compétition chez les mêmes athlètes sur le mode d'utilisation des qualités physiques au cours de deux performances d'endurance isoénergétiques.

Dans les prochains paragraphes, nous présenterons les tests physiologiques permettant d'estimer le métabolisme anaérobie en essayant de déterminer leurs modes d'application optimaux et leurs limites.

2. COMMENT MESURER LE MÉTABOLISME ANAÉROBIE DES CYCLISTES

L'énergie anaérobie se trouve dans le corps humain sous forme de réserves d'adénosine triphosphate (ATP), de créatine phosphate (CP), et de glucose libre et de glycogène musculaire (Ferguson et coll., 2010; Noordhof et coll., 2010; Noordhof et coll., 2013).

Le métabolisme anaérobie comme le métabolisme aérobie se caractérisent par une capacité et une puissance (Baron, 2001; Noordhof et coll., 2013). La plupart des auteurs considèrent que les réserves d'ATP déterminent la puissance du métabolisme anaérobie, tandis que la capacité anaérobie est déterminée par l'ensemble des systèmes d'ATP-CP et de la glycolyse anaérobie (Billat et coll., 2003; Wilmore et Costill, 2002).

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

2.1. La puissance anaérobie et les tests d'évaluation:

La puissance anaérobie est le taux maximal d'énergie pouvant être développée de manière anaérobie dans un laps de temps donné (Wilmore et Costill, 2002). La puissance anaérobie chez les cyclistes est habituellement estimée par un test de Wingate de 30 s sur un ergocycle de type Monark. Ce test consiste à faire 5 min d'échauffement suivies de 5 min de récupération, puis le sujet commence le test avec une accélération maximale de 3 secondes contre une charge nulle, suivie immédiatement par la mise en place de la charge de résistance sur la roue d'inertie durant toute la durée de l'exercice. La charge de la résistance varie selon la condition physique du sujet : elle est de 0,075 $g.kg^{-1}$ pour les sujets non entraînés et de 0,095 $g.kg^{-1}$ pour les athlètes. La puissance développée est calculée avec des tranches variant de 1 à 5 s. Trois paramètres sont identifiés, la puissance pic (PP), la puissance moyenne (PM), et l'indice de fatigue (IF) (Bar-Or, 1987; Dekerle et coll., 2008). La puissance pic est considérée comme un paramètre qui représente la puissance anaérobie (Bar-Or, 1987; Baron, 2001). Cependant, avec l'appareillage et le protocole utilisé au cours du test Wingate, l'inertie d'accélération n'est pas prise en compte, ce qui engendre une sous-estimation du PP de 3 à 20 % (Baron, 2001). Pour cela, le test modifié par Baron (2001) en utilisant un ergomètre isocinétique est plus fiable pour estimer la PP. C'est un exercice de sprint supramaximal de 10 secondes sur un ergocycle isocinétique. Le test consiste à faire 10 min d'échauffement contre une résistance de 1 $W.kg^{-1}$ suivies de 1 min de récupération passive avant le début de l'épreuve de 10 secondes. La cadence doit être fixée à environ à 100 rpm (80 – 120 rpm) pour atteindre la puissance pic du sujet.

Un inconvénient de ces tests est que les ergocycles utilisés ne sont pas spécifiques aux cyclistes qui sont habitués d'accomplir leurs épreuves sur des vélos adaptés sur mesure. Un autre inconvénient est que les protocoles de ces tests ne sont pas conformes à la réalité de l'effort fait pendant les compétitions. Par exemple, lors des départs, le cycliste choisit une résistance optimale mise au niveau de l'engrenage afin de développer la puissance la plus élevée. Ils doivent de plus vaincre l'inertie, puisqu'au départ le vélo est à vitesse nulle. Les cyclistes peuvent «cliper» leurs pédales en position assise et ensuite se mettre debout sur les pédales pour accélérer, ce qui n'est pas permis au cours des deux tests précédemment mentionnés. Donc, ces protocoles sous-estiment peut-être encore la PP développée au cours des tests.

2.2. La capacité anaérobie et les tests d'évaluation :

La capacité anaérobie représente la quantité maximale d'énergie qui peut être développée de manière anaérobie jusqu'à l'épuisement des substrats et indépendamment du temps. Elle est estimée par trois méthodes, à savoir le déficit maximal d'oxygène accumulé (DMOA), l'efficacité brute (EB) et le concept de la puissance critique (PC-W') (Noordhof et coll., 2013).

2.2.1. Le déficit maximal d'oxygène accumulé (DMOA) :

Le DMOA est estimé en se basant sur la relation linéaire entre la consommation d'oxygène et l'intensité d'un exercice très intense causant l'épuisement (Noordhof et coll., 2013). La recherche originale de Medbø et coll. (1988) consistait à faire 10 × 10 min d'exercices à différentes intensités sous-maximales, pour tracer une courbe de régression décrivant l'évolution du VO_2 en fonction de l'intensité pour chaque sujet.

L'extrapolation de cette courbe nous permet d'estimer la demande énergétique au cours d'un exercice nécessitant un taux d'énergie dépassant la puissance maximale du métabolisme aérobie (le VO_2 max).

Suite à cette étape, le sujet réalise un exercice constant à une intensité très intense dépassant sa PAM. Au cours de l'exercice, qui devrait durer de 2 à 4 min, la consommation d'oxygène augmente progressivement jusqu'à atteindre le VO_2 max. Afin de pouvoir satisfaire les demandes énergétiques de l'exercice très intense, la capacité du système aérobie se trouve insuffisante, donc le corps a recours à l'énergie fournie par le système anaérobie. Éventuellement, l'épuisement se produit lorsque le système anaérobie n'est plus capable de soutenir la demande énergétique de l'exercice.

En utilisant la ligne de régression du VO_2 qu'on a construite pour chaque sujet, on calcule la différence entre la consommation d'oxygène estimée pour accomplir la demande énergétique de l'exercice très intense et la consommation d'O_2 effective à chaque 15 ou 20s. La somme des différences calculée jusqu'à l'épuisement constitue le déficit maximal d'oxygène accumulé (Figure 3). Il est important d'indiquer que le DMOA est un volume d'oxygène exprimé en ml ou $ml \cdot kg^{-1}$ alors que le VO_2 est un débit d'oxygène exprimé en $ml.min^{-1}$ ou $ml.kg^{-1} \cdot min^{-1}$. Pour transformer le DMOA d'un volume d'O_2 en une quantité de travail exprimée en joules, on multiplie le volume de déficit d'O_2 par 21 puisque 1 ml d'oxygène utilisé par le corps produit un travail équivalant à 21 joules (Billat et coll., 2003; Medbø et coll., 1988; Noordhof et coll., 2013).

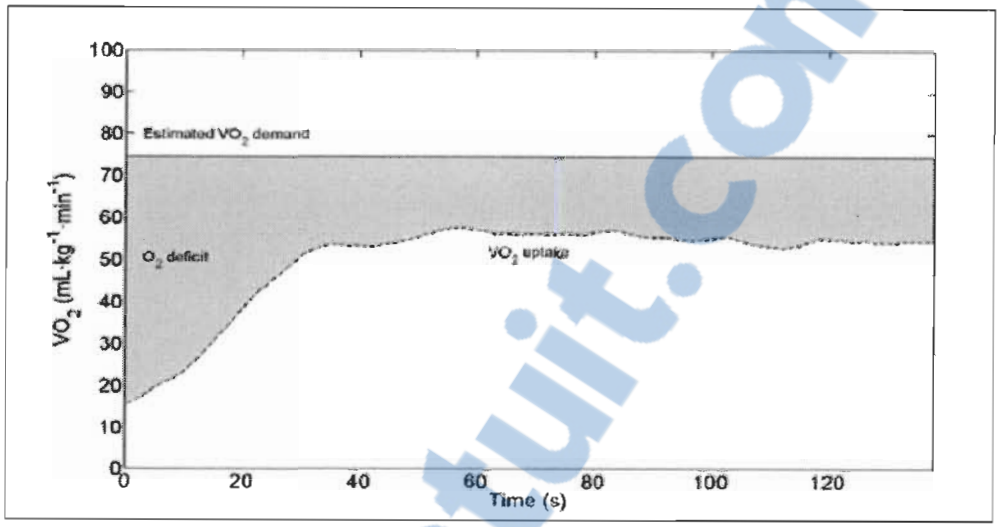


Figure 3 : Calcul du déficit maximal d'oxygène accumulé au cours d'un exercice constant à une intensité très élevée (Noordhof et coll., 2013)

Noordhof et coll. (2010) ont démontré que le DMOA est fiable pour mesurer la capacité anaérobie, mais il y a des données contradictoires au sujet de la reproductibilité des résultats. Cette inconstance est due essentiellement aux méthodes statistiques non adaptées utilisées par certains chercheurs ainsi qu'aux différents protocoles adoptés pour estimer le DMOA.

Le point le plus sensible au niveau du protocole du test de DMOA est l'exercice à intensité constante qui sert à tracer la ligne de régression du VO_2. Il est démontré que la durée des exercices répétés, leur intensité et leur nombre sont des paramètres qui affectent la droite de régression décrivant la relation entre la puissance et le VO_2. Par conséquent, le calcul du DMOA est altéré (Noordhof et coll., 2011). Avec la comparaison de différents protocoles, il est recommandé de faire 10 × 4 min entre 30 et 90 % du VO_2 max au lieu du protocole original de Medbø et coll. (1988). Cette méthode permet de construire la droite de régression de l'évolution du VO_2 optimal qui donne

Rapport-Gratuit.com

par la suite le DMOA le plus précis (Noordhof et coll., 2010; 2011, 2012). Spécifiquement pour les cyclistes, une cadence de 90 à 100 rpm doit être adoptée durant les exercices faits pour calculer le DMOA. Avec une cadence supérieure, le DMOA est significativement surestimé à cause des perturbations qui se produisent au niveau de la cinétique du VO_2 lorsque la cadence augmente à 120 ou 130 rpm (Noordhof et coll., 2010).

2.2.2. L'efficacité brute (EB)

L'efficacité brute permet de calculer la capacité anaérobie par la soustraction du travail mécanique aérobie du travail mécanique total au cours d'un exercice sous-maximal constant conduisant à l'épuisement (Figure 4). Pour mesurer la puissance mécanique développée par le métabolisme aérobie, il faut prendre en considération l'efficacité du sujet testé pour transformer le travail métabolique en travail mécanique. Pour cela, l'économie à l'effort est prise en considération, comme le montre l'équation 3 :

$$PM_{aérobie} = [(VO_2 \times (4940 \times QR + 16040)] \times EE ,$$

équation dans laquelle le VO_2 est la quantité d'oxygène consommée en fonction du temps, QR est le quotient respiratoire et EC l'économie du cyclisme (Noordhof et coll., 2011; 2013).

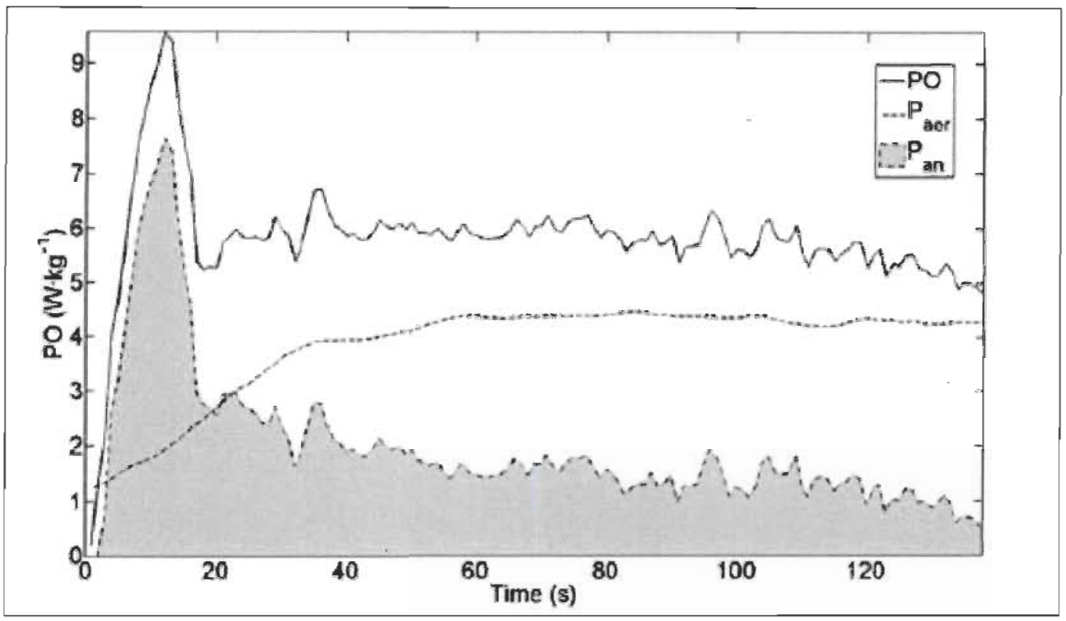


Figure 4 : Calcul de l'efficacité brute à travers un exercice sous-maximal amenant à l'épuisement (Noordhof et coll., 2013)

Dans notre cas, l'économie à l'effort est spécifiquement l'économie du cyclisme (EC) qui peut être mesurée par un exercice constant de 6 min à une intensité de 60 % du VO_2 max, avec une cadence de 90 rpm. Le niveau de consommation d'oxygène enregistré entre la 3ième et la 6ième minute est considéré comme l'économie du cycliste. Pour que la mesure soit validée, il faut que le VO_2 mesuré dans les 3 dernières minutes atteigne un plateau et que le quotient respiratoire soit inférieur à 1 (Noordhof et coll., 2011). Pour avoir une estimation optimale de la puissance anaérobie avec la méthode de l'efficacité brute, il faut faire un exercice constant à une intensité sous-maximale le plus proche possible de l'état stable maximal de lactatémie et que le QR ≤ 1 (Noordhof et coll., 2013).

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

2.2.3. Le concept de la puissance critique (PC-W')

Monod et Scherrer (1965) ont démontré une relation hyperbolique entre l'énergie mise en œuvre pendant les exercices et le temps d'épuisement à différentes intensités constantes, relation qui se traduit par l'équation suivante :

$$W = W' + PC.\ Tlim \text{ [équation 4].}$$

Cette relation montre l'existence de deux paramètres, la puissance critique (PC) qui était appelée au début *«seuil de fatigue locale»*, et la W' qui se présente sous forme d'énergie constante sollicitée au cas où la puissance de l'exercice dépasse la PC. La première recherche qui a validé cette notion sur tout le corps humain est celle de Moritani et coll. (1981). Cette étude consiste à faire quatre exercices très intenses à charge constante jusqu'à l'épuisement et il permet de montrer que le travail limite et le temps limite sont en relation hyperbolique avec un R carré de 0,982; $p<0,01$.

La PC est considérée comme la puissance à laquelle le système aérobie satisfait totalement à la demande énergétique en travaillant à son maximum. La W' est une quantité de travail constante sous forme de réserve énergétique anaérobie qui représente la capacité anaérobie mise en œuvre lorsque l'exercice dépasse la PC (Moritani et coll., 1981). Jusqu'à nos jours et suite aux différentes recherches qui se sont focalisées sur la PC et la W', la définition de ces deux paramètres n'a pas beaucoup changé.

La puissance critique apparait à un taux de travail semblable à celui de l'état stable maximal de lactatémie (MLSS) (Pringle et Jones, 2002). C'est la puissance qui permettrait de solliciter le métabolisme aérobie à son taux maximal pour une période

durable qui dépasse les 20 minutes (Hill, 1993; Monod et Sherrer, 1965; Moritani et coll., 1981)

La W' est exprimée en J ou kJ. Il représente la capacité anaérobie du sujet. C'est une quantité de travail constante recrutée au-dessus de la PC et elle est la même, quelle que soit l'intensité de l'exercice, au-dessus de la PC où plus l'intensité de l'exercice est élevée plus l'épuisement du sujet sera rapide. La W' renferme l'énergie dérivée de l'ATP-CP, de la glycolyse anaérobie, et des myoglobines chargées d'O_2 (Jones et coll., 2010).

2.2.3.1. Les modes d'estimation de la PC et du W' :

Généralement le test pour déterminer la PC et la W' se fait par 3 à 5 épreuves séparées l'une de l'autre d'au moins 24h. L'estimation de la PC et du W' peut se faire avec aussi peu que deux épreuves de temps limites à charge constante jusqu'à l'épuisement, séparées de 5 minutes, dont la puissance maintenue devrait engendrer l'épuisement entre 1 et 10 min. Mais plus le nombre d'épreuves utilisées est grand, plus la marge d'erreur est faible. La durée de l'exercice est mesurée à la seconde et l'effort est arrêté lorsque la cadence baisse de plus de 5 rpm sous la cadence préférée choisie pendant plus de 5 s (Hill, 1993; Jones et coll., 2010; Vanhatalo et coll., 2007).

Les mesures obtenues de la PC et de la W' doivent être fortement corrélées, ce qui indique que les sujets ont réellement utilisé leur maximum au cours des exercices à temps limite. Il existe cinq méthodes de calcul de la PC et la W' à partir des exercices de Tlim :

(1) Modèle linéaire ==> P = W' + (PC. Tlim)

(2) Modèle linéaire à l'inverse du temps ==> P = W/Tlim + PC

(3) Modèle hyperbolique (non- linéaire à deux paramètres) ==> Tlim = W'/ (P – PC)

(4) Modèle non linéaire à trois paramètres ==> Tlim= (W'/ (P – PC)) – (W'/(Pmax-PC))

(5) Modèle exponentiel ==> P = PC + (Pmax-PC).exp(-t/τ)

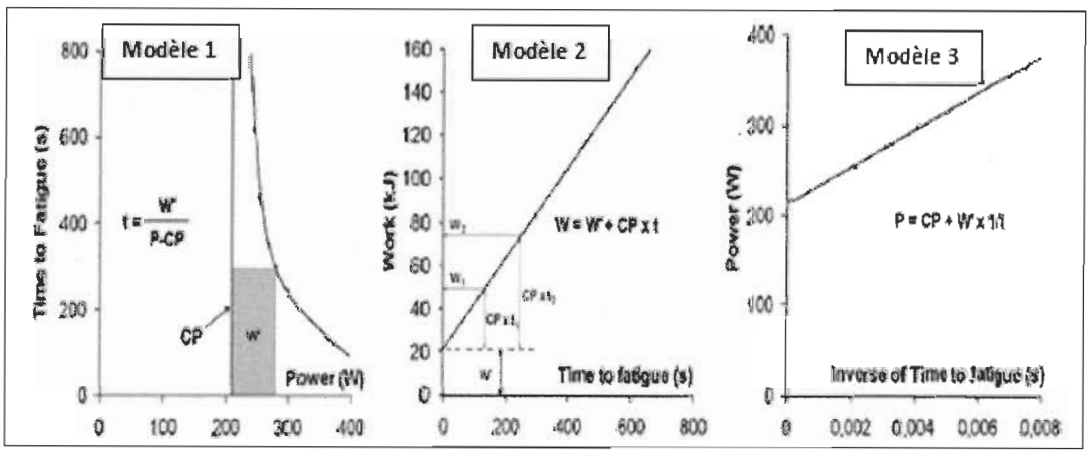


Figure 5 : Les trois modes de calcul les plus naturels de la puissance critique et de la capacité anaérobie (Dekerle et coll., 2008)

Les deux méthodes linéaires (1 et 2) et la méthode hyperbolique (3) sont les plus utilisées. Elles sont les plus naturelles, car le temps d'épuisement (Tlim) est une variable dépendante et la puissance (P) est une variable indépendante (Jones et coll., 2010).

Pour cela, le calcul de la W' avec les équations qui utilisent deux paramètres (modèles 1, 2, 3) (Figure 5) permet d'avoir des résultats plus valides que celles avec 3 paramètres (modèles 4, 5) (Noordhof et coll., 2013). Hill et coll. (2002) ont recommandé d'utiliser ces trois modèles de calcul et de prendre en considération la PC

la plus concordante d'entre eux.

2.2.4. La comparaison entre les méthodes d'estimation de la capacité anaérobie chez les cyclistes :

La comparaison des valeurs de la capacité anaérobie estimée avec le DMOA et la PC-W' sur un ergocycle chez les hommes et les femmes ne montre pas une différence significative (Hill et Smith, 1993; Jenkins et Quigley, 1991). Les études récentes, malgré qu'elles confirment ces résultats, ont montré qu'il y a un décalage de valeur calculée entre les deux méthodes pour le même participant, ce qui rend difficile leur utilisation d'une manière interchangeable (Dekerle et coll., 2006; Noordhof et coll., 2013).

La méthode d'efficacité brute (EB) a été comparée avec le DMOA uniquement sur un ergocycle électromagnétique avec 15 cyclistes masculins bien entrainés. Les résultats de cette comparaison sont similaires à la comparaison entre le DMOA et la PC-W', où les deux valeurs de capacité anaérobie estimées sont pareilles, mais il y a une différence importante entre les données d'un même participant entre les deux tests (Noordhof et coll., 2013).

2.3. Conclusion :

La mesure directe du métabolisme anaérobie pour tout le corps au cours de l'exercice n'a pas encore été mise en évidence jusqu'à nos jours (Noordhof et coll., 2013). Pour la puissance du système anaérobie, un exercice supramaximal court sur un ergocycle qui prend en compte la cinétique d'accélération est recommandé pour estimer la puissance pic du sujet.

Pour la capacité anaérobie, différentes méthodes ont montré qu'elles sont capables d'estimer ce paramètre, telles que le déficit maximal d'oxygène accumulé (DMOA), l'efficacité brute (EB) et le concept de la puissance critique (PC-W') (Noordhof et coll., 2013). Il a été démontré que ces méthodes estiment la capacité anaérobie, mais on ne peut pas les utiliser d'une manière interchangeable. Il est recommandé de choisir l'une des méthodes et de l'utiliser d'une manière constante en suivant les recommandations mentionnées ci-dessus (Noordhof et coll., 2013).

D'une part, les problèmes reliés à ces méthodes, comme la complexité et la durée des protocoles utilisés, rendent difficile leur utilisation (application et fréquence) par les entraîneurs ou les cyclistes au cours de leur saison. D'autre part, beaucoup de variables doivent être contrôlées selon la méthode choisie pour obtenir une bonne mesure, tels la cadence, le nombre d'essais de prétest, la durée de l'exercice constant, etc. Ce contrôle permet de diminuer les chances d'erreurs au cours des tests et re-tests, sans quoi la comparaison de la performance du sujet au cours de la saison devient à la fois difficile et pas assez fiable.

En revanche, d'autres tests ont été récemment développés pour permettre d'estimer à la fois la capacité et la puissance anaérobies tout en diminuant le besoin de réaliser un nombre élevé de tests et de séances, en diminuant le coût du test et en facilitant l'évaluation.

Quels sont ces tests? Comment ont-ils été développés? Est-ce qu'ils permettent de prédire adéquatement la performance d'endurance? Est-ce qu'ils sont reproductibles? Ce sont des questions que nous aurons à développer dans notre dernière partie.

3. LES TESTS DE 3 MIN SUPRAMAXIMAUX :

3.1. Origine et développement du test de 3min supramaximal

Plus tôt dans le texte, nous avons indiqué que l'un des paramètres tirés du test de Wingate 30 s est la puissance moyenne déployée par les cyclistes. Dans la littérature, la puissance moyenne est considérée comme un paramètre qui décrit la capacité anaérobie. Néanmoins, Bar-Or (1987) a montré qu'un effort d'une durée de 30 s n'est pas suffisant pour épuiser la totalité du métabolisme anaérobie. Avant les recherches de Medbø et coll. (1988) sur le DMOA, les chercheurs n'étaient pas certains que la capacité anaérobie puisse être mesurée au cours d'un test d'une durée inférieure à 2 min. Gastin et Lawson (1994) ont vérifié le résultat de Bar-Or (1987) en montrant que le DMOA n'est pas atteint à 30 s avec un exercice explosif supramaximal de 90 s, mais il est atteint dès les 60 s et atteint un plateau jusqu'à la fin du test. En outre, la puissance développée dans les 30 dernières secondes est le produit du travail du métabolisme aérobie seul. Donc en se basant sur le concept de la puissance critique, qui dit qu'elle représente la capacité maximale du système aérobie d'où provient l'énergie totale, et puisque la PC ne peut être atteinte qu'en cas d'épuisement de la capacité anaérobie «P = (W'/t) + PC» (Hill et coll., 1993; Moritani et coll., 1981; Poole et coll., 1988; 1990), Dekerle et coll. (2006) ont émis l'hypothèse que la puissance finale (PF) dans les 10 dernières secondes d'un test de 90 s supramaximal doit être égale à la PC, et que le travail accompli au-dessus de la PF tout au long du test soit similaire à celui de la capacité anaérobie (W'). En utilisant la même base de données, Brickley et coll. (2007) et Dekerle et coll. (2006) ont montré qu'au cours du test de 90 s explosif supramaximal sur un ergocycle isocinétique (SRM), la PF

surestime la PC, mais le travail accompli au-dessus de la PF est égal au W'.

Burnley et coll. (2006) ont prolongé le test de 90s à 3 min sur un ergocycle électromagnétique afin que la puissance finale baisse davantage et qu'elle ait plus de temps pour se stabiliser. Par conséquent, la PF devient équivalente à la PC, et le travail accompli au-dessus de la PF a été similaire à celle de la capacité anaérobie (W').

3.2. Test de 3 min supramaximal sur ergocycle électromagnétique

Le test de Burnley et coll. (2006) consiste à faire un test de VO_2 max avec incrémentation de $30W.min^{-1}$. Puis, la résistance fixée au cours de la $PC_{3\ min}$ est relativisée par rapport à la différence entre la P-SL2 et la PAM du sujet mesurées au cours du test de VO_2 max. En utilisant le facteur linéaire de l'ergocycle électromagnétique, le sujet développe une puissance de 50 % Δ (Δ= PAM – P-SL2) lorsqu'il atteint sa cadence préférée au cours du déroulement du test.

Le test de la $PC_{3\ min}$ de Burnley et coll. (2006) a bien montré sa fidélité dans l'étude de Vanhatalo et coll. (2007), ainsi que sa reproductibilité pour estimer la PC, la W' et le VO_2 max dans l'étude de Johnson et coll. (2011).

Il est remarquable que les résultats du test de 90 s et $PC_{3\ min}$ soient en contradiction avec le concept de la PC, qui dit que si la capacité anaérobie est totalement épuisée, théoriquement la PC est atteinte (PC = W'/t $\times$ P si la W'=0 donc la puissance développée P = PC) (Dekerle et coll., 2008). En effet, comment le test de 90 s permet d'estimer la W', mais la PF est surestimé, alors que le test de la $PC_{3\ min}$ estime aussi la W', mais la PF est égale à la PC ?

L'explication de ce phénomène provient des recherches de Ferguson et coll. (2010), et de Jones et coll. (2003), qui ont montré des preuves indirectes que la W' n'est pas constituée uniquement des réserves énergétiques d'ATP, de PCr, de glycolyse anaérobie et de l'O_2 stockés au niveau des myoglobines, mais aussi d'un niveau d'accumulation des déchets métaboliques comme le phosphate inorganique (Pi), les ions H^+, et le potassium K^+. Par conséquent, la PC ne peut pas être atteinte si l'organisme n'atteint pas son niveau de tolérance anaérobie maximal au cours de l'exercice.

3.3. Test supramaximal de 3 min sur un ergocycle Monark :

Bergström et coll. (2013a, b, c) ont mesuré des réponses neuromusculaires, respiratoires, mécanomyographiques et métaboliques similaires lors d'exercices d'intensité très élevée, c'est-à-dire que la PF du test $PC_{3\ min}$ surestime la PC. En revanche, Bergström et coll. (2012) ont inventé un nouveau test supramaximal de 3 min, son protocole est plus court et plus simple, pouvant se faire sans un test préalable de VO_2 max, et il utilise un matériel moins dispendieux. Le test de Bergström utilise un ergocycle Monark. Il commence par 5 min d'échauffement avec une résistance de 1 kg, puis directement on demande au sujet d'atteindre une cadence de pédalage de 110 rpm avant l'application de la charge de résistance sur la roue. Deux charges de résistance sont testées, soit 3,5 % et 4,5 % du poids du corps. Le test de $PC_{4,5\ \%}$ se montre plus fidèle à mesurer la PC et la W' que le test de $PC_{3,5\%}$.

Rapport-Gratuit.com

3.4. Test supramaximal de 3 min avec la bicyclette personnelle du sujet

Un troisième test supramaximal de 3 min a été développé par Francis et coll. (2010) en utilisant cette fois la bicyclette personnelle du cycliste. L'objectif était de développer le test original de Burnley et coll. (2006) en faisant moins de séances d'expérimentation, en utilisant un matériel abordable et utilisable par les athlètes, et en faisant le test d'une manière plus naturelle.

Le test PC de 3 min supramaximal avec l'utilisation du Computrainer ($PC3_{SM}$) de Francis et coll. (2010) commence par la fixation de la roue arrière du vélo du cycliste sur la dynamo électromagnétique isocinétique du Computrainer™. Puis, le cycliste fait un échauffement de 5 min à 100 W, suivi par 5 min de récupération passive. Ensuite, le départ est donné par un signal de l'expérimentateur. Le sujet n'est pas informé du temps écoulé durant le test de 3 min. Par contre, à la différence des deux autres tests $PC_{3\ min}$ et $PC_{4,5\ \%}$, l'athlète a le droit de choisir le développement qu'il préfère au début et de le changer au fur et à mesure du test afin de développer la puissance la plus élevée possible éventuellement..

Francis et coll. (2010) ont trouvé que la PF du $3min^{SM}$ sur Computrainer est égale à 95% de la PAM et ils l'ont considérée comme la PC, malgré que, généralement, la PC se situe à 75 ± 5% de la PAM (Burnley et coll., 2006; Vanhatalo et coll., 2007). Donc, si le $3min^{SM}$ surestime la PC, selon la définition du concept de la puissance critique (PC –W') décrit précédemment, la capacité anaérobie sera sous-estimée. McClave et coll. (2011) ont examiné la capacité des cyclistes à maintenir la PF du test de $PC3_{SM}$, qu'elle permet de maintenir une durée équivalente à celle

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

maintenue par la PC dérivée de la méthode conventionnelle, et par conséquent la PF est égale à la PC. L'étude a été faite avec 21 cyclistes de montagne et de route, d'une moyenne d'âge de 40,5 ± 10,7 ans. Les résultats ont montré que la PC est égale à 79% de la PAM et que cette dernière peut être maintenue durant 14,79 ± 8,38 min, ce qui est inférieur à la durée de 20 min décrite dans la littérature afin de vérifier si la puissance maintenue est la PC. Donc, McClave et coll. (2011) ont conclu que la PF du test $PC3_{SM}$ surestime la PC.

En effet, la recherche de McClave et coll. (2011) ne nous permet pas de confirmer que le $3min^{SM}$ surestime la PC, car on ne peut pas se baser seulement sur la durée des exercices de temps limite pour définir la PC. La meilleure méthode est de comparer la PF directement avec la PC estimée par la méthode conventionnelle illustrée à la figure 5. De plus, les temps limites des cyclistes s'étalent entre 4,75 et 31,40 min, donc il y a des sujets qui ont peut-être atteint leur PC lors du test de 3 min_{SM}. Ce grand écart entre les temps s'explique par l'hétérogénéité du groupe. Au niveau de l'âge, la moyenne et l'écart-type sont trop élevés, sachant qu'il y a 6 sujets qui dépassent les 40 et 50 ans. D'autre part, McClave et coll. (2011) ont évalué uniquement la cinétique du VO_2 pour appuyer leur interprétation du temps limite réalisé. Pourtant, si on veut être certain de la PC, il faut des analyses de l'évolution de l'acide lactique, de la ventilation, de la fréquence cardiaque, du quotient respiratoire et de la perception de l'effort avec l'analyse de la cinétique du VO_2 et la détermination du temps limite (Gaesser et Poole, 1996; Hill et coll., 2002; Poole et coll., 1988; 1990). Pour cela, il faut des recherches plus contrôlées afin de vérifier le test de $3min^{SM}$.

Même en admettant que le test de $3min^{SM}$ surestime la PC, il est encore

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

possible que le travail réalisé au-dessus de la PF soit égal à la capacité anaérobie, comme c'était le cas avec Dekerle et coll. (2006) en faisant un test de Wingate 90 s. Nous avons fait une étude pilote afin de vérifier que le travail réalisé au-dessus de la PF du test de 3min^{SM} est égal à la capacité anaérobie (annexe « A »). Les résultats de 28 athlètes de sexe masculin nous ont montré que la capacité anaérobie est totalement épuisée entre les 90 et 105s du test de 3min^{SM}. Notre résultat est en concordance avec ceux de Dekerle et coll. (2006) et Gastin et Lawson (1994). Par conséquent, notre étude pilote appuie l'hypothèse affirmant que la détermination de la PC ne peut être réalisée que si la W' est épuisée en atteignant le seuil d'accumulation métabolique maximal. D'autre part, nous avons développé une autre hypothèse selon laquelle la capacité anaérobie peut être estimée avec un test supramaximal atteignant ou dépassant 90 s, indépendamment de la charge de résistance ou du matériel utilisé. Comme conclusion générale, nous sommes arrivé à démontrer que la réalisation du test de 3min^{SM} en utilisant le Computrainer est valide et reproductible pour estimer la capacité anaérobie et non pas la PC. De plus, avec un départ explosif en position debout avec le vélo personnel du cycliste et un ergocycle qui prend en considération l'inertie d'accélération au départ, le Computrainer est préférable au Monark ou au SRM isocinétique pour estimer la puissance pic qui représente à la fin la puissance du métabolisme anaérobie.

4. HYPOTHÈSE :

- À la lumière des recherches précédemment répertoriées, notre première hypothèse est que la capacité et la puissance du système anaérobie vont être positivement et significativement corrélées avec la performance en endurance sur un parcours ascendant et ce, davantage que sur un parcours plat

- Notre deuxième hypothèse est que le changement des caractéristiques de deux parcours isoénergétiques, plat et ascendant, est accompagné par une modification de la stratégie de recrutement des systèmes énergétiques.

- Notre troisième hypothèse et que les sujets qui démontrent une capacité anaérobie supérieure seront ceux qui solliciteront le plus leur système anaérobie lors d'un parcours ascendant.

5. LES SYSTEMES ÉNERGETIQUES ANAÉROBIES ET LA PERFORMANCE EN ENDURANCE DES CYCLISTES SELON LE TYPE DE PARCOURS

Idriss Sassi, Claude Lajoie, Louis Laurencelle, François Trudeau*

Département des Sciences de l'activité physique, Université du Québec à Trois-Rivières, Trois-Rivières, QC, Canada, G9A 5H7

***Auteur pour correspondance :**
François Trudeau, PhD, FACSM
Département des sciences de l'activité physique
Université du Québec à Trois-Rivières
3351, boul. des Forges, C.P. 500
Trois-Rivières (Québec) Canada G9A 5H7
Téléphone: (819) 376-5011 Extension 3767
Fax: (819) 376-5092
Courriel: francois.trudeau@uqtr.ca

Manuscrit à être soumis

Résumé :

Objectif : L'objectif principal de notre recherche est d'étudier la contribution des systèmes anaérobies à produire du travail sur un parcours plat et un parcours ascendant chez des cyclistes routiers. Le deuxième objectif est de vérifier si les sujets qui possèdent une capacité anaérobie supérieure seront ceux qui solliciteront le plus leur système anaérobie lors d'un parcours ascendant. Le troisième objectif est d'étudier l'influence des caractéristiques du terrain sur le mode de recrutement des paramètres physiologiques.

Méthodologie : Dix cyclistes de route et trois triathloniens ont participé volontairement à la recherche. Lors des 4 visites, l'athlète réalise un test de PAM pour déterminer les paramètres physiologiques aérobies (puissance aérobie maximale (PAM), VO_2max, seuil lactique 1 (SL1), seuil lactique 2 (SL2), économie à l'effort (EE)), et à la deuxième séance un test de 3 min supra-maximal (3min^{SM}) afin d'estimer la puissance pic (PP) et la capacité anaérobie (W'). Par la suite, deux tests de performance isoénergétiques randomisés ont été réalisés lors des troisième et quatrième séances, un test de 20 km sur un parcours ascendant et un autre de 28 km sur un parcours plat. Tous les tests ont été réalisés en laboratoire en utilisant le vélo personnel de l'athlète fixé à un dynamomètre (Computrainer, Seattle, WA, USA). Les parcours des tests de performance, le cycliste et son compétiteur virtuel sont exposés en 3D devant le cycliste à l'aide d'un vidéo projecteur.

Résultats : La capacité et la puissance anaérobies sont négativement corrélées avec la puissance moyenne relative (PM/r) de 20 km sur un parcours ascendant (-0,65, $p<0,01$; -0,59, $p<0,05$). Pourtant, le système anaérobie n'a pas d'influence déterminante sur la performance en endurance sur le parcours plat (PP : r = 0,30, W' : r = 0,16). Avec une analyse de régression linéaire multiple, la variation de la puissance observée au cours de la performance de 20 km n'est définie que par des paramètres physiologiques relatifs (PM/r 20 km = 2.744 + (PAM/r x 1.273) + (VO_2/r x -0.015) + (EE/r x -1.154) + (W/r x -0.001) + 0,054, R^2 ajusté = 0,93). Pourtant, la variation de la puissance observée au cours de la performance de 28 km est expliquée seulement par des paramètres absolus (PM 28 km = (SL1 x 0.476) + (EE x 0.872) + 983,21, R^2 ajusté = 0,89). De plus, les cyclistes ont réalisé la même quantité de travail sur les deux parcours, mais la quantité de travail anaérobie produite au cours du 20 km ascendant est plus élevée de 53,4% que celle réalisée au cours du 28 km plat de 53,4% (21 324 J vs 12 068 J; $p<0,001$). D'un autre côté, la quantité de travail aérobie produite au cours du 28 km est plus élevée de 7,9 % que celle produite au cours du 20 km (691 057 J vs 636 556 J; $p<0,05$).

Conclusion : Le métabolisme anaérobie influence davantage l'épreuve en endurance ascendante chez les cyclistes, en atténuant la prédiction de la performance. Sur un parcours plat, ni la capacité ni la puissance anaérobie n'ont d'influence significative sur la performance en endurance des cyclistes. Sur des terrains comportant des dénivellations, ce sont les paramètres physiologiques relatifs (c.-à-d. exprimés en standardisant par le poids du cycliste) qui déterminent la performance, alors que les paramètres physiologiques absolus déterminent la performance sur des parcours plats.

Introduction

Les paramètres aérobies comme la consommation maximale d'oxygène (VO_2max), les seuils lactiques (SL1 et SL2), l'économie à l'effort (EE), et la puissance aérobie maximale (PAM) représentent les principaux paramètres prédicteurs de la performance en endurance (Faria et coll., 2005a; Faria et coll., 2005b; Impellizzeri et Marcora, 2007; Jones et Carter, 2000). Par contre, des recherches effectuées chez des coureurs à pied ont montré que la capacité et la puissance des systèmes énergétiques anaérobies sont corrélées positivement et prédisent la performance en endurance pour des distances de 5, 8 et 10 km et dont la durée d'effort varie de 15 à 35 min (Baumann et coll., 2012; Bulbulian et coll., 1986; Houmard et coll., 1991; Nummela et coll., 2006; Paavolainen et coll., 1999; Sinnett et coll., 2001; Tharp et coll., 1997). Richard Davison et coll. (1999) ont montré que la puissance moyenne relative à la masse corporelle lors d'un test de Wingate était significativement corrélée à des performances en cyclisme exécutées en pente sur tapis roulant pour de courtes durées variant de 4 à 16 min. Par contre, à notre connaissance, aucune étude n'a vérifié la contribution du métabolisme anaérobie à la performance sur des distances plus longues en pente qui représentent mieux les compétitions chez des cyclistes de route. En général, les parcours de compétition en cyclisme sur route sont rarement plats et, de plus, l'intensité de l'effort varie beaucoup selon les stratégies, les tactiques et les sprints des compétiteurs, nécessitant ainsi le déploiement des systèmes anaérobies.

Le premier objectif de cette étude sera d'identifier l'implication des systèmes anaérobies estimée par des tests valides sur la performance en endurance de plus de 30 min chez des cyclistes de route une fois sur un parcours plat et une autre fois sur une ascendante.

Dans les articles de synthèse, la distance ou la durée des compétitions sont toujours prises en considération afin d'expliquer les principaux paramètres mis en œuvre au cours de la performance en endurance (Faude et coll., 2009; Joyner et Coyle, 2008). Par contre, il y a des évidences qui montrent que même le type de terrain est un facteur qui influence les paramètres déterminant la performance. En effet, les paramètres en termes relatifs sont aptes qu'en termes absolus à prédire la performance de cyclisme de montagne ou ascendante (Gregory et coll., 2007; Heil et coll., 2001). Mais avec la performance de cyclisme sur un parcours plat, les paramètres en termes absolus prédominent pour prédire la performance (Hawley et Noakes, 1992).

Le deuxième objectif est de vérifier si les paramètres physiologiques anaérobies permettent de prédire la performance lorsque le terrain est ascendant.

Pour cela, notre troisième objectif est de vérifier l'effet du changement des caractéristiques du terrain de compétition pour les mêmes athlètes sur la réponse des qualités physiques au cours de deux performances d'endurance isoénergétiques.

Méthodologie

Participants

Treize athlètes entraînés de sexe masculin (10 cyclistes et 3 triathloniens) ont participé à la recherche. Tous les participants avaient au moins deux ans d'expérience d'entraînement et de compétition de niveaux régional à national. Les participants ont reçu une explication individuelle du protocole et des risques éventuels à participer à cette étude. La participation était volontaire et sanctionnée par un formulaire de

consentement individuel. L'étude a été approuvée par le comité de déontologie de la recherche de l'UQTR.

Les participants étaient avisés de ne pas faire d'exercices intenses et de ne pas consommer d'alcool, de tabac ou de caféine dans les 24 heures qui précédaient chaque test. Comme il est recommandé par la SCPE (2003), la pression artérielle moyenne était mesurée avant et après chaque test. Le participant ne pouvait commencer le test ou quitter le laboratoire sans que sa pression artérielle ne soit jugée normale. Durant tous les tests de l'étude, les recommandations de la SCPE ont été suivies.

Protocole:

Le devis expérimental global de cette étude demandait que chaque participant visite le laboratoire à 4 occasions à l'intérieur d'une période maximale de 14 jours. Durant la 1^{ière} et la 2ième visite, les participants devaient réaliser 2 tests d'effort, un test de puissance aérobie maximale (PAM) et un test de 3 min supra-maximal (3 min^{sm}) entrecoupés d'au moins 24 heures de récupération. Durant la 3ième et la 4ième visite, les participants devaient réaliser deux tests de performance de manière randomisée séparés par au moins 48 heures de récupération.

Les tests ont été réalisés en laboratoire en utilisant le vélo personnel du cycliste et le Computrainer, lequel permet de simuler les pistes et les conditions de la compétition d'effort. Tous les tests se sont déroulés au laboratoire de physiologie de l'exercice de l'UQTR, à une température de 20 à 22 °C et une humidité de 35 à 50%.

Rapport-Gratuit.com

Équipements:

La taille des participants est mesurée durant la première visite à l'aide d'une toise fixée au mur (Seca 208, FRANCE). Le poids corporel et la masse grasse ont été mesurés avant chaque test en utilisant une bio-impédance (Tanita, Body Composition Analyzer BF-350, JAPON).

Tous les tests ont été faits avec le Computrainer (Racermate, Computrainer Lab model 8001; RacerMate Inc, Seattle, WA, USA), sur lequel le vélo personnel du participant était fixé. Le Computrainer est un appareil électromagnétique qui applique les forces de résistance sur la roue arrière du vélo en contact avec son générateur. Ce dernier est relié à un calculateur de puissance qui joue l'intermédiaire entre le générateur et l'ordinateur afin de transmettre les résistances programmées. Par contre, le test de 3 min_{SM} et les deux tests de performance ont été programmés par le logiciel Computrainer 3D, version 3, afin de produire une simulation de parcours incluant son compétiteur virtuel. Tous les tests ont été exposés en utilisant un projecteur vidéo et un écran posé devant le cycliste. La pression de la roue arrière mise en contact avec le générateur est vérifiée avant et après chaque test afin de contrôler si la pression maximale est toujours maintenue. Après les 10 minutes d'échauffement préalable aux tests, le Computrainer est calibré à 3,5 livres pour éviter le glissement de la roue. Le Computrainer est validé comme un appareil fidèle et reproductible au cours des tests constants à différentes charges de résistance et au cours des performances de longue durée dont la charge de résistance change brutalement et continuellement (Cane et coll., 1996; Peveler, 2013; Rivera et McGregor, 2005; Wharton, 2004). Puisque le Computrainer permet de reproduire fidèlement la performance programmée avec un

parcours plat ou une piste montagneuse (Peveler, 2013; Rivera et McGregor, 2005), on a utilisé un calculateur d'énergie commercial (cf. le site internet « http:// bikecalculator.com / about.html ») qui utilise les mêmes formules programmées dans les puissances-mètre CycleOps PowerTap SL 2.4 ou Garmin International, Olathe, KS, USA.

La roue arrière des vélos des cyclistes est remplacée par la roue de laboratoire équipée d' un puissance-mètre au niveau de son moyeu (PowerTap Pro CycleOps, Madison, WI, USA). Le puissance-mètre est connecté par Bluetooth avec un calculateur de puissance (CycleOps PowerTap SL 2.4), qui détermine la puissance développée, la cadence, la vitesse et le torque à un taux d'échantillonnage de 1 Hz. Ce calculateur a été validé (Bertucci et coll., 2005; Gardner et coll., 2004; Rivera et McGregor, 2005). Après chaque test, les données sont filtrées et enregistrées sur logiciel Excel[md] après avoir été traitées par le logiciel fourni par la même compagnie qui a produit la puissance-mètre (Power Agent, Power Tap, CycleOps).

Avant tous les tests, l'analyseur de gaz Moxus (AEI Technologies USA) était calibré selon les recommandations décrites dans le guide d'utilisation. Le Moxus a montré qu'il est fidèle et reproductible (Medbø et coll., 2012; Rosdahl et coll., 2013). La fréquence cardiaque était enregistrée à la seconde tout au long des tests par un cardiofréquencemètre (Polar Electro Inc., Woodbury. N.Y., USA).

La lactatémie est analysée par un analyseur portable de lactate (Pro Lactate, Arkray Inc., Kyoto, JAPON) dont la fidélité a été évaluée (Baldari et coll., 2009; Pyne et coll., 2000). Il est considéré comme le meilleur des analyseurs portables sur le marché (Tanner et coll., 2010).

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Test maximal à charge progressivement croissante (PAM) :

Le test de PAM I5 est un test maximal à charge progressivement croissante qui contient des séquences de récupération. Le test est constitué de paliers de travail de 5 min séparés par 3 min de récupération active à 1 W/kg^{-1}, sauf pour les deux premiers paliers où le passage est fait sans récupération. Le test commence avec une charge de résistance de 130 W et, après chaque palier, une incrémentation de 30 W est ajoutée. Durant le test, les participants sont verbalement encouragés. Le test est fini lorsque le participant est épuisé ou qu'il n'est plus capable de maintenir sa cadence préférée ± 10 rpm pendant plus de 10 s. Après la fin du test, le participant récupère pendant 10 min à 50W. Les données des deux dernières minutes de chaque palier sont prises ont considération afin de déterminer les valeurs des paramètres physiologiques correspondant au palier. Le VO_2max était considéré atteint avec deux des quatre critères suivants : 1) un plafonnement (± 150 ml) du VO_2 même si la puissance de travail est augmentée; 2) un quotient d'échange respiratoire (RER) > 1,1; 3) une fréquence cardiaque ≥90% de la FC max théorique (220-âge) et 4) une lactatémie supérieure à 8mM.

La PAM est la puissance enregistrée au palier associé à l'atteinte du VO_2max. Avec les analyses de lactate des 30 dernières secondes de chaque palier, le seuil aérobie (SL1) est défini à la puissance associée à l'élévation de 1 mM de lactate par rapport à la valeur de repos. Le seuil anaérobie (SL2) est déterminé à un point fixe de 4 mM (Faude et coll., 2009; Francis et coll., 2010).

L'économie à l'effort (EE) est calculée à 70% du VO_2max par une équation de régression linéaire simple créée par la cinétique du VO_2 et la puissance demandée dans chaque palier.

Le test supramaximal de 3 minutes (3 min^{SM}) :

Ce test commence par 10 min d'échauffement à 100W suivies par 5 min de récupération passive, puis, immédiatement après la récupération passive, l'épreuve commence par un compte à rebours (3, 2, 1, GO) affiché par un projecteur vidéo. Après la fin du test, le cycliste fait une récupération active à 50W pendant 10 min.

Il est demandé au participant de développer le maximum de sa puissance tout au long de la durée du test. Avant le départ, le cycliste réalise deux essais de 10 secondes afin de se familiariser avec le test et de fixer son engrenage idéal de départ par rapport à la résistance du test. Puis, durant le déroulement du test, le cycliste a le loisir de changer son engrenage afin de développer le maximum de la puissance tout au long des 3 minutes. Le cycliste reçoit un fort encouragement durant le test mais sans obtenir d'information sur le temps écoulé (Francis et coll., 2010).

La puissance pic est définie comme la puissance la plus élevée mesurée à la seconde au cours du test. La puissance finale (PF) est la moyenne de puissance développée dans les 30 dernières secondes. La capacité anaérobie est définie comme la quantité de travail accompli au-dessus de la puissance finale durant le test.

Les performances virtuelles :

Les parcours et les caractéristiques des deux performances (20 et 28 km) sont exhibés dans les figures 1 et 2. La performance de 20 km (Figure 1) comprend 5 tours de 4 km avec un total d'élévation de 442,1 m. Les caractéristiques des pentes sont présentées à la figure 1a. La performance de 28 km sur un parcours plat comprend des pentes légères (±1%) (Figure 2).

Les deux performances ont été randomisées de manière aléatoire au cours des 3ième et 4ième visites. Avant chaque épreuve, les cyclistes réalisent un échauffement de 10 min suivi par 5 minutes de récupération. L'intensité de l'échauffement est programmée à 80% du SL2 de chaque participant afin de minimiser l'influence de l'intensité d'échauffement sur la cinétique de VO_2 et la W' dans les premières minutes qui suivent le départ (Burnley et coll., 2011; Faisal et coll., 2009).

Comme dans les compétitions réelles, les cyclistes peuvent voir leur puissance développée, la distance accomplie et le temps écoulé. De plus, le cycliste réalise sa performance contre un compétiteur virtuel programmé pour maintenir 70% de la PAM du cycliste tout au long de la compétition, ce afin de le stimuler. Durant la performance, le cycliste peut changer son engrenage ou sa cadence ou se mettre en position debout afin d'optimiser sa performance. De plus, chaque cycliste est fortement encouragé dès le début de la performance.

La consommation d'oxygène et la fréquence cardiaque sont enregistrées tout au long de la performance, et la lactatémie est mesurée à la fin de chaque tour de la performance de 20 km à 4 km et à chaque 5,6 km au cours de la performance de 28 km. Chaque tour de 4 km dans le parcours ascendant est l'équivalent de 5,6 km sur le parcours plat.

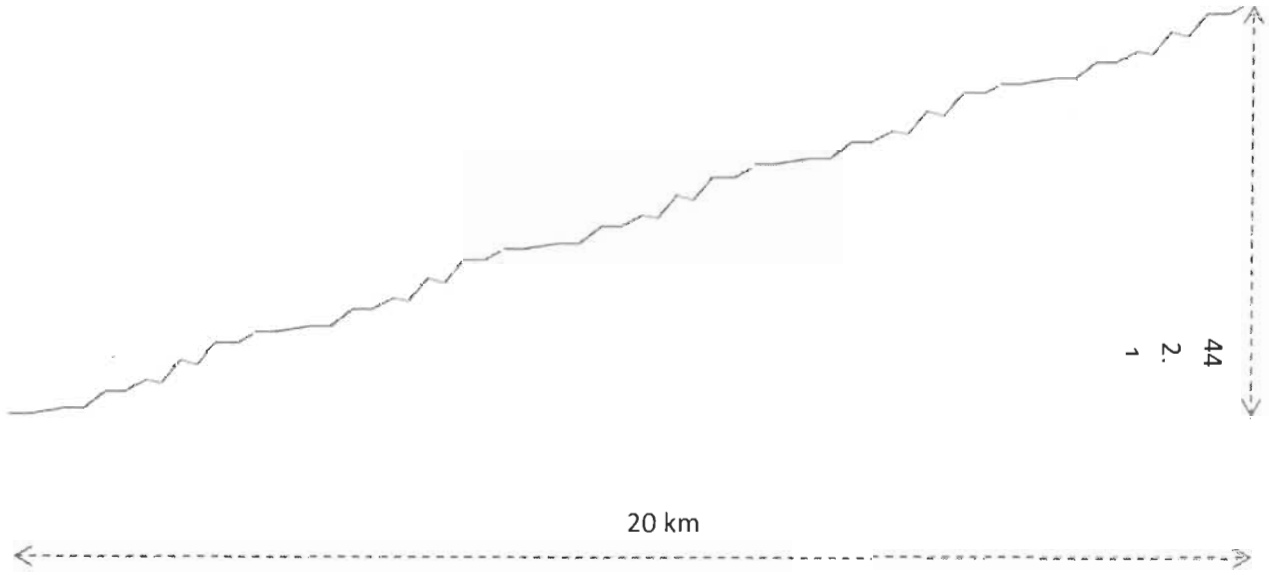


Figure 1: Profil du parcours de 20 km

Figure 1a: Profil d'un tour de 4 km dans le parcours de 20 km

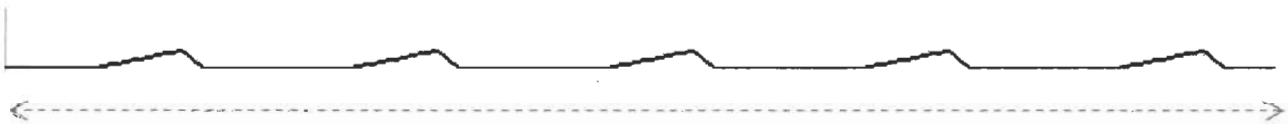


Figure 2: Profil du parcours de 28 km

Analyse statistique :

La moyenne et l'écart type sont calculés pour tous les paramètres mesurés dans notre étude. Le coefficient de variation (CV) est calculé pour les paramètres physiologiques et de la performance. Une analyse en composantes principales suivie de rotations orthogonales de type Varimax est effectuée sur le groupe des paramètres aérobies et anaérobies. La corrélation de Pearson est utilisée afin de déterminer la relation de chaque paramètre physiologique (variables indépendantes) avec la performance sur 20 km et 28 km (variables dépendantes). La performance est décrite sous forme de la puissance moyenne développée au cours des deux épreuves 20 et 28 km.

Des régressions linéaires multiples partielles, de mode « descendant » et « pas-à-pas », ont été réalisées afin de déterminer la meilleure combinaison de prédicteurs pour expliquer la variation de la puissance observée au cours des deux performances à partir des variables indépendantes. Le choix de cette meilleure combinaison est basé sur le coefficient de détermination R^2) ajusté et le Cp de Mallow le plus bas calculé. Le seuil de signification de $p < 0,05$ est accepté. Toutes les analyses statistiques ont été faites à l'aide du logiciel SAS (version 9,4).

Résultats

Le tableau 1 montre les caractéristiques anthropométriques des 13 athlètes ayant participé à notre étude.

Tableau 1. Caractéristiques anthropométriques des participants

	Âge (ans)	Poids (kg)	Taille (cm)	% de graisse
N=13	30,85 ± 8,76	70,54 ± 9,51	174,77 ± 6,02	23,04 ± 2,35

kg : kilogramme; cm : centimètre

Le tableau 2 décrit les variables physiologiques évaluées lors du test de PAM. Le coefficient de variation de chaque paramètre est écrit en terme relatif et absolu.

Tableau 2. Paramètres physiologiques obtenus au test de PAM.

	Valeur absolue	CV %)	Valeur relative	CV × 100
VO_2max ($l.min^{-1}$; $ml.kg^{-1}.min^{-1}$)	4,43±0,49	11,06	60,63 ± 8,48	13,98
PAM (W ; W. kg^{-1})	296,92 ± 32,75	11,02	4,26 ± 0,64	15,02
SL2 (W ; W. kg^{-1})	225,73 ± 20,82	9,22	3,24 ± 0,49	15,12
SL1 (W ; W. kg^{-1})	195,41 ± 24,63	12,60	2,81 ± 0,52	18,50
EE (W ; W. kg^{-1})	203,14 ± 22,57	11,11	2,93 ± 0,43	14,67
FCmax (bpm)	180,67 ± 13,44	7,43	//	

VO_2max : consommation maximale d'oxygène, PAM : puissance aérobie maximale, SL2 : seuil lactique (4 mM), SL1 : seuil aérobie, EE : économie à l'effort, FCmax : fréquence cardiaque maximale, CV : coefficient de variation, $l.min^{-1}$: litre d'oxygène par minute, $ml.kg^{-1}.min^{-1}$: millilitre d'oxygène par minute par kilogramme de poids corporel, W : watts, $W.kg^{-1}$: watts par kilogramme du poids corporel, bpm : battements par minute.

Les variables physiologiques tirées du test de 3min^{SM} sont décrites dans le tableau 3.

Tableau 3. Paramètres physiologiques tirés du test de 3min^{SM} :

Test de 3min^{SM}	Absolu	CV×100	Relatif	CV×100
PP (W ; W. kg^{-1})	960,84 ± 162,25	16,88	22,74 ± 5,17	22,73
W' (J; J.kg^{-1})	12365,88 ± 3640,15	23,68	294,24 ± 104,15	35,39
Wtot (J; J.kg^{-1})	62778,38 ± 6517,97	10,38	899,30 ± 110,10	12,24
PF (W ; W. kg^{-1})	279,98 ± 36,40	13,00	3,97 ± 0,63	15,86
VO_2max (l·min^{-1}; ml.kg^{-1}.min^{-1})	4,40 ± 0,45	10,22	62,45 ± 8,49	13,60
FCmax (bpm)	171,91 ± 11,84 bpm			

PP : puissance pic, W' : capacité anaérobie, Wtot : travail total au cours du 3min^{SM}, PF : puissance finale des 30 dernières secondes de 3min^{SM}, VO_2max : consommation maximale d'oxygène, FCmax : fréquence cardiaque maximale, CV : coefficient de variation, W : watts, W.kg^{-1} : watts par kilogramme du poids corporel, J : joule, J.kg^{-1} : joule par kilogramme du poids corporel, bpm : battements par minute.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

À travers les coefficients de variation des variables aérobies (VO_2max, PAM, SL1, SL2, et EE) et des variables anaérobies (PP, et W'), l'analyse descriptive nous montre que les variables liées au système aérobie sont plus homogènes (CV) que celles liées aux systèmes anaérobies. D'autre part, les CV des variables relatives sont plus importants que les CV des variables décrites en terme absolu.

La comparaison montre que le VO_2max absolu et relatif déterminé par le test de PAM n'est pas différent de celui estimé par le test de 3min^{SM}. Pourtant, la FCmax

atteinte au cours du test de 3min[SM] était significativement moins élevée que celle mesurée au cours du test PAM (180,67 ± 13,44 vs 171,91 ± 11,84 bpm; p<0,01).

Tableau 4. Analyse factorielle des paramètres aérobies et anaérobies

Matrice des composantes après rotation

	Composante		
	1	2	3
SL2/r	**,978**	,015	-,123
SL1/r	**,976**	,118	-,097
PAM/r	**,928**	,233	-,193
EE/r	**,865**	,277	-,290
VO_2/r	**,811**	,229	-,218
EE	,069	**,961**	-,031
PAM	,265	**,948**	,079
VO2	,041	**,878**	,077
SL2	,430	**,743**	,197
SL1	,552	**,702**	,152
W	-,105	,082	**,965**
W/r	-,390	-,028	**,895**
PP	-,144	,451	**,639**

Méthode d'extraction : Analyse en composantes principales.
Méthode de rotation : Varimax avec normalisation de Kaiser.

VO_2max : consommation maximale d'oxygène, PAM : puissance aérobie maximale, SL2 : seuil anaérobie, SL1 : seuil aérobie, EE : économie à l'effort, PP : puissance pic, W' : capacité anaérobie, /r : relative par rapport au poids du corps.

Comme le montre le tableau 4, l'analyse en composantes principales (avec rotations varimax) des 14 variables physiologiques mesurées au cours de notre étude a permis d'identifier 3 composantes. La première composante (colonne 1) regroupe surtout toutes les variables aérobies en terme relatif et explique à elle seule 49,31% de la variance totale des 14 variables. La deuxième composante (colonne 2) regroupe

Rapport-Gratuit.com

tous les variables aérobies en terme absolu, expliquant 27,83 % de la variance totale des 14 variables. La dernière composante (colonne 3) explique 10,43 % de la variance et elle regroupe les deux paramètres (et trois variables) anaérobies.

La performance aux deux épreuves est exprimée en termes de la puissance moyenne (PM) en Watts développée durant la réalisation de chaque épreuve. La PM enregistrée lors de l'épreuve du parcours ascendant (20 km) était similaire à celle obtenue sur le parcours plat de 28 km (244,68 ± 21,60 vs 242,48 ± 30,52 W ; p=0,73). En relativisant la puissance moyenne par la masse corporelle, on observe aussi des résultats similaires entre les deux épreuves (PM/r 20km : 3,50 ± 0,08 vs PM 28km : 3,47 ± 0,58; p=0,86). La quantité de travail en joules réalisée sur les deux types de parcours était aussi similaire (Tableau 5).

Tableau 5. Caractéristiques mécaniques des deux performances

	PM (W)	PM/r (W/kg)	Wtot (kJ)	Wtot/r (J/kg)
20 km	244,68 ± 21,60	3,50 ± 0,08	657,880 ± 63,58	937,6 ± 0,54
28 km	242,48 ± 30,52	3,47 ± 0,58	703,125 ± 71,58	100,98 ± 1,53

20 km : performance de 20 km sur un parcours ascendant, 28 km : performance de 28 km sur un parcours plat, PM : puissance moyenne développée sur toute la durée de l'épreuve, exprimée en watts (W), Wtot : travail total calculé en joule (J), /r : relative par rapport au poids du corps.

Puisque le temps de 20 km était fortement relié avec la PM relative au poids des participants et non pas avec la PM brute (PM : r = -0,15; p>0,05 vs PM/r : r = -0,77; p<0,001), la performance de 20 Km sur un parcours ascendant est exprimée en puissance moyenne relative (PMr = 3,50 ± 0,32). Pour la performance de 28 Km, c'est la puissance moyenne absolue (PM = 242,50 ± 30,53) qui est choisie comme une

performance, car elle était en forte relation avec le temps sur 28 km alors que la PM relative présente une faible relation (PM : r = -0,67; p<0,01 vs PM/r : r = -0,38; p>0,05).

Tableau 6 : Les paramètres aérobies et anaérobies en corrélation avec les deux types de parcours.

28 km sur parcours plat			20 km sur parcours ascendant		
Test	Variable	Corrélation	Test	Variable	Corrélation
Test PAM			Test PAM		
	PAM	0,92***		SL2/r	0,91***
	EE	0,91***		PAM/r	0,90***
	SL2	0,84***		SL1/r	0,89***
	SL1	0,84***		EE/r	0,84***
	VO_2max	0,63**		VO_2max/r	0,80***
	EE/r	0,50*		SL2	0,49*
				SL1	0,48*
Test 3min^{SM}			Test 3min^{SM}		
	VO_2pic	0,65*		Wtot	0,85***
	Wtot	0,57*		VO_2pic	0,76***
				W'/r	-0,65**
				PP/r	-0,59*

VO_2max : consommation maximale d'oxygène, PAM : puissance aérobie maximale, SL2 : seuil anaérobie, SL1 : seuil aérobie, EE : économie à l'effort, PP : puissance pic, W' : capacité anaérobie, Wtot : travail total au cours du 3min^{SM}, /r : relatif.
* : p<0,05; ** : p<0,01; *** : p<0,001

Le tableau 6 montre les corrélations significatives entre les paramètres aérobies et anaérobies obtenues aux tests de PAM et 3 min^{sm} avec les performances de 28 et 20 km. Le tableau 6 montre aussi que les paramètres relatifs tirés des deux tests sont plus corrélés que les paramètres absolus avec la performance sur un parcours ascendant. En contrepartie, pour la performance sur le plat, les paramètres absolus

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

sont plus corrélés que les paramètres relatifs. La capacité anaérobie (W') et la puissance anaérobie (PP) se trouvent corrélées significativement seulement avec la performance sur le parcours ascendant. En outre, contrairement à tous les autres paramètres aérobies, les corrélations du W'/r et de la PP/r avec la PM/r de 20 km sont négatives, signifiant qu'elles sont négativement associées à la performance. Par contre, sur le parcours plat, les paramètres anaérobies (W') et (PP) présentent une très faible corrélation avec la performance (W' : r = 0,05 et PP : r = 0,12).

Lorsqu'on sépare les parcours en 5 sections égales, la W' et la PP en termes relatif ou absolu ne présentent aucune corrélation avec la performance sur chaque section du parcours plat de 28 km. Par contre, durant la performance sur parcours ascendant de 20 km, la PP/r et la W'/r sont corrélées de façon négative avec la PM/r de chaque tour. Mais il est remarquable que le système anaérobie limite davantage la performance au 5ième tour du parcours ascendant, comme le montre le Tableau 7.

Tableau 7 : Corrélations entre les paramètres anaérobies et la puissance moyenne développée durant chaque tour dans les deux parcours.

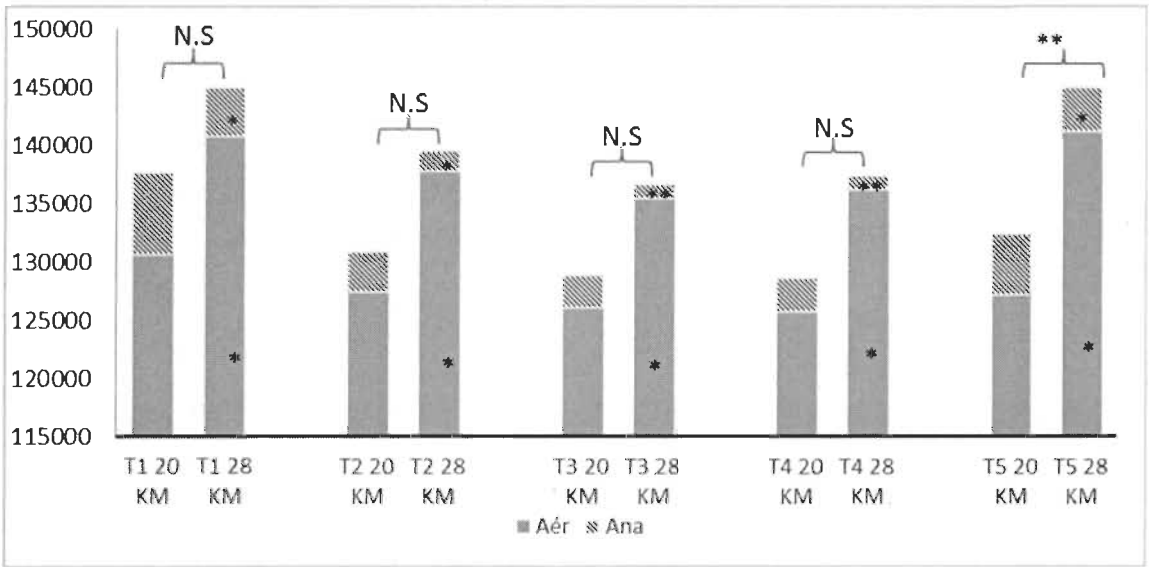
	PM de 28 km sur un parcours plat					PM/r de 20 km sur un parcours ascendant				
	Tour 1	Tour 2	Tour 3	Tour 4	Tour 5	Tour 1	Tour 2	Tour 3	Tour 4	Tour 5
PP	0,34	0,24	0,29	0,28	0,31	-0,06	-0,04	-0,01	-0,16	-0,32
PP/r	0,08	0,03	0,10	0,16	0,22	-0,55*	-0,48*	-0,45	-0,54*	-0,68**
W'	0,14	0,10	0,21	0,12	0,21	0-,34	-0,25	-0,28	-0,43	-0,51*
W'/r	-0,00	-0,02	0,09	0,04	0,15	-0,62*	-0,50*	-0,53*	-0,62*	-0,71**

PP : puissance pic, PP/r : puissance pic relative, W' : capacité anaérobie, W'/r : capacité anaérobie relative.* : corrélation significative à p<0,05; ** : corrélation significative à p<0,01.

Une analyse par tour de la quantité de travail et de la répartition énergétique entre les deux performances montre que l'énergie nécessaire pour accomplir les 4

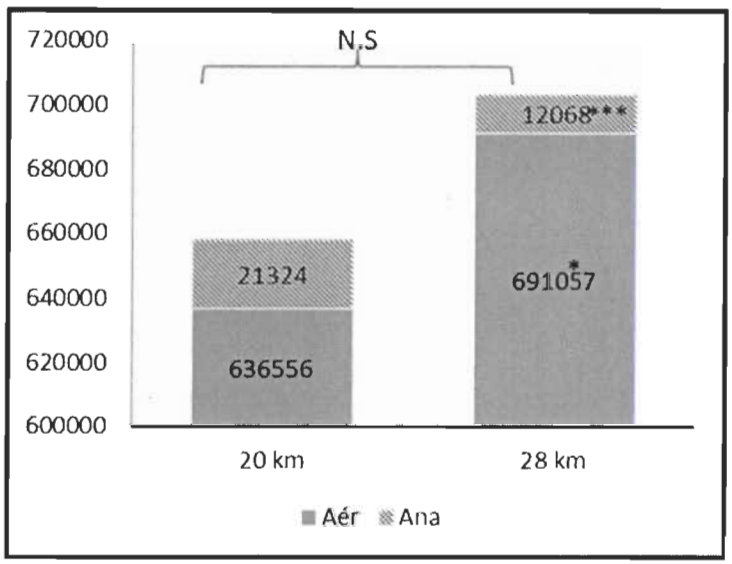
premiers tours des deux parcours était semblable (Figure 3). Cependant, le travail accompli lors du 5ième tour du parcours plat était significativement plus important que celui observé au 5ième tour du parcours ascendant. Au niveau de la répartition énergétique, le métabolisme anaérobie est sollicité d'une manière significativement plus importante au cours du parcours ascendant par rapport au plat. Par contre, le métabolisme aérobie est sollicité d'une manière plus importante durant toute l'épreuve du parcours plat par rapport à l'ascendant (Figure 3). Des résultats similaires étaient observés en comparant le travail aérobie et anaérobie réalisé au cours de la performance en entier (Figure 4). La corrélation de la puissance et de la capacité anaérobie avec la quantité du travail anaérobie réalisée au cours des deux épreuves n'a montré de valeurs significatives aucun des deux parcours. Toutefois au cours de l'épreuve ascendante, on observe une tendance à utiliser plus d'énergie anaérobie chez les cyclistes qui présentent plus de W'/r (W'/r et travail anaérobie sur 20 km : $r = 0,43$, $p = 0,07$). Une analyse séquentielle du travail anaérobie réalisé au cours des deux épreuves dans chaque tour, a montré que les cyclistes qui présentent une W'/r plus élevée sont en mesure de produire plus de travail anaérobie dans le tour final des deux parcours (W'/r et travail anaérobie au 5ième tour de 20 et 28 km : $r = 0,55$, $r = 0,57$; $p<0,05$).

Figure 3 : Travail aérobie et anaérobie (en Joules) à chaque tour au cours du parcours ascendant de 20 km et plat de 28 km



Tn 20 km : le travail en joules réalisé au tour indiqué (n) au cours du 20 km, Tn 20 km : le travail en joules réalisé au tour indiqué (n) au cours du 20 km, le travail produit par le système anaérobie, le travail produit par le système anaérobie, * et ** : différence significative de $p<0,05$ et $p<0,01$, respectivement, entre le 20 et le 28 km, N.S : pas de différence significative entre le travail réalisé entre 20 et 28 km.

Figure 4 : Répartition du travail aérobie et anaérobie (en Joules) sur la distance entière au cours des deux parcours



le travail produit par le système anaérobie, le travail produit par le système anaérobie, * et ** : différence significative de p<0,05 et p<0,01, respectivement, entre le 20 et le 28 km, N.S : pas de différence significative entre le travail réalisé entre 20 et 28 km.

Une analyse de régression linéaire multiple de mode descendant a montré que l'ensemble formé par le SL1 et l'EE explique 89% de la variation de la puissance observée au cours de la performance sur un parcours plat de 28 km (Équation 1). D'autre part, l'ensemble comprenant la PAM/r, le VO_2/r, l'EE/r, et la W'/r explique 93% de la variation de la puissance relative développée au cours des 20 km sur un parcours ascendant (Équation 2).

Équation 1 : PM 28 km = (SL1 x 0,476) + (EE x 0,872) + 983,21

Équation 2 : PM/r 20 km = 2,744 + (PAM/r x 1,273) + (VO_2/r x -0,015) + (EE/r x -1,154) + (W/r x -0,001) + 0,054

Discussion

À notre connaissance, cette recherche est la première à étudier la contribution du système anaérobie lors d'épreuves en endurance sur un parcours ascendant en comparaison avec un parcours plat chez les cyclistes de route. Notre première hypothèse affirmait que le système anaérobie était un élément qui pouvait aider la performance en endurance des cyclistes sur un parcours ascendant et ce, davantage que sur un parcours plat. Cette étude nous a permis d'observer que la capacité et la puissance anaérobies avec une corrélation partielle négative sont plutôt des facteurs atténuants de la performance en endurance sur des parcours qui présentent des pentes prononcées. Par contre, ces variables anaérobies ne sont pas un prédicteur négatif de la performance en endurance des cyclistes de route sur un parcours plat.

Les résultats de cette étude ont montré que les caractéristiques des deux parcours isoénergétiques suggèrent différents modes de sollicitation des systèmes énergétiques anaérobies. Le système anaérobie est beaucoup plus sollicité au cours du parcours ascendant par rapport au parcours plat même si la dépense énergétique était identique dans les deux épreuves (Figure 4). Contrairement notre hypothèse de départ qui suggérait que le système anaérobie était primordial pour réussir une bonne performance sur un parcours ascendant, nous observons plutôt que la puissance

maximale aérobie relative était la variable la plus prédictive de la performance (équation 2). Par contre, sur le parcours plat, la puissance de travail associé au seuil lactique 1 est la variable la plus prédictive (équation 1). Costa et Fernando (2008) et Inoue et coll. (2012) ont trouvé que ni la puissance anaérobie ni la capacité anaérobie n'avait d'influence sur des épreuves réelles de cross-country chez des vététistes. La divergence entre notre étude et les précédentes pourrait s'expliquer par le choix des tests qui évaluent l'énergie produite par les systèmes anaérobies. En effet, Costa et Fernando (2008) et Inoue et coll. (2012) ont utilisé un test de Wingate de 30 sec, alors que dans notre étude, nous avons utilisé le test de 3 min^{sm}. Selon Vanhatalo et coll. (2007), le test de 3 min^{sm} permet de mesurer avec plus de précision l'énergie déployée par les systèmes anaérobies. Il a été démontré que le protocole de Wingate sous-estime de 3 à 20% la PP (Baron, 2001) et de 18 % la capacité anaérobie (Bar-Or, 1987; Gastin et Lawson, 1994). Ces différences d'estimation pourraient expliquer pourquoi nous observons des divergences entre les études.

Notre troisième hypothèse voulait démontrer que les sujets qui possédaient une capacité anaérobie supérieure étaient ceux qui solliciteraient le plus leur système anaérobie lors d'un parcours ascendant. Cette hypothèse s'est seulement confirmée lors de la phase finale de l'épreuve ascendante, à savoir que les sujets qui possédaient plus de capacité anaérobie étaient ceux qui réussissaient à développer le plus de puissance anaérobie en fin de parcours (tour 5).

Les systèmes énergétiques et la performance en endurance :

À notre connaissance, notre recherche est la première qui a étudié la contribution du système anaérobie à la performance en endurance chez les cyclistes

de route. Sur le parcours plat, le système anaérobie n'a pas amené une grande contribution à la performance (PP et PM 20km; r = 0,31, W' et PM 20km; r = 0,16). Afin de réaliser une meilleure performance, il fallait avoir une bonne performance aérobie brute (Tableau 6 et Figure 3). Sur le parcours ascendant, le système anaérobie contribue significativement à la performance, mais il y joue comme un rôle atténuateur (PP/r et PM/r 20km; r = -0,60, W'/r et PM/r 20km; r = -0,66). De plus, on a montré que le système anaérobie est beaucoup plus sollicité au cours du parcours ascendant par rapport au parcours plat malgré que la même dépense énergétique était réalisée dans les deux épreuves.

Costa et Fernando (2008) et Inoue et coll. (2012) ont trouvé que ni la puissance ni la capacité anaérobie n'ont d'influence sur les performances de 28 et de 31,5 km sur des parcours montagneux. Ceci est peut être expliqué par le test d'évaluation choisi, soit la PP et la PM du Wingate 30s qui sont utilisées comme des paramètres qui représentent la puissance et la capacité anaérobies des athlètes. Mais le protocole de Wingate 30 s sous-estime la PP de 3 à 20% (Baron, 2001). D'autre part, la capacité anaérobie représentée par la PM est sous-estimée de 18 % (Bar-Or, 1987; Gastin et Lawson, 1994).

En course à pied, sur des parcours plat ou dénivelé (cross-country), la puissance et la capacité du système anaérobie contribuent positivement à la performance en endurance pour des distances comprises entre 5 et 10 km (Baumann et coll., 2012; Houmard et coll., 1991; Nummela et coll., 2006; Paavolainen et coll., 1999; Sinnett et al, 2001; Tharp et coll., 1997). Ces recherches sont en contradiction avec nos résultats puisque nous n'observons aucune indice de la contribution du

système anaérobie à la performance sur le parcours plat. D'autre part, nos résultats sur le parcours ascendant sont en contradictions avec les étude effectuées en course à pied au niveau de l'influence du système anaérobie à la performance en cyclisme, la contribution de ce dernier étant de diminuer la performance (PP/r : r = -0,60, W'/r : r = -0,66 tableau 6, « W/r x - 0,001 » équation 2).

En effet, on ne peut pas expliquer la contradiction entre les résultats en course à pieds avec nos résultats en vélo par la longueur de la performance, car au niveau de la contribution du métabolisme anaérobie sur le parcours plat, on a trouvé que même au début de la performance (tour 1 : 5,6 km) le système anaérobie n'était pas sollicité d'une manière significative (PP : r = 0,34, W' : r = 0,14; Tableau 7). Au niveau du mode d'influence du système anaérobie à la performance en endurance ascendante des cyclistes par rapport à la course, on a observé que, dès les premiers 4 km, le système anaérobie est associé négativement à la performance (PP : r = - 0,55, W' : r = - 0,62; Tableau 7).

Donc, le type de sport étudié est le facteur qui influence la contradiction de nos résultats avec ceux obtenus en course à pied. En effet, les deux sports utilisent un seul mouvement répété pour se déplacer, mais la course à pied est plus stressante, car le poids du corps implique une résistance continuelle sur le corps et des charges brutales et perpétuelles à chaque foulée. Par contre en cyclisme sur un parcours plat, le stress sur la masse corporelle est presque absent sur le parcours ascendant, le poids du corps s'ajoute à la difficulté de la performance sans application de stress brutal sur le système musculo-squelettique (Nagle et Brooks, 2001; Scofield et Hecht, 2012).

Il est clair que la performance en endurance des cyclistes sur le parcours plat

Rapport-Gratuit.com

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

dépend plus largement de l'efficacité du système aérobie (Figure 1). Sur le parcours ascendant, 1) la contribution significative du système anaérobie à la performance et son effet limitatif, 2) et la relation inverse qui existe entre la capacité anaérobie et la capacité aérobie (W'/r et SL2/r : r = - 0,50; p<0,05) et entre la puissance aérobie et la puissance anaérobie (PP/r et VO_2max : r = - 0,57; p<0,05) montrent que la performance en endurance des cyclistes sur un parcours ascendant dépend plus du système aérobie que lors de la performance sur un parcours plat.

Les caractéristiques du terrain et la performance :

La durée ou la distance du parcours étaient toujours les seuls paramètres utilisés pour expliquer la relation des paramètres physiologiques à la performance (Faude et coll., 2009; Joyner et Coyle, 2008).

Dans notre recherche, les deux parcours ont été programmés pour être isoénergétiques, et par conséquent, la quantité de travail accompli et la moyenne de la puissance réalisées dans les deux épreuves en termes relatif ou absolu sont similaires (Tableau 5, Figures 1 et 2). Par contre, nous avons observé que les participants qui présentaient une puissance moyenne relative élevée (PMr = 3,50 ± 0,32) étaient en mesure de réussir l'épreuve ascendante en moins de temps (r = -0,77; p<0,001), ce qui n'était pas le cas lorsque le poids des sujets n'était pas considéré (-0,15; p>0,05). Par contre, les sujets qui développaient une puissance moyenne absolue élevée (PM = 242,50 ± 30,53) étaient ceux qui réussissaient un meilleur temps sur le parcours plat (r =-0,67; p<0,01). Ce dernier résultat est en accord avec celui de Davidson et coll. (1999), qui ont montré que la corrélation de la PM de 1 et 6 km dans des pentes de 12 ou 6% avec le temps réalisé devient plus importante et significative si la PM est

exprimée par rapport au poids corporel (1 km ➔ r = -0,42 à r = -0,95; 6 km ➔ -0,15 à -0,92).

En outre, malgré que le même travail global réalisé au cours des deux épreuves et durant chaque tour est similaire, sauf au 5ième tour, la répartition de l'énergie produite par le système aérobie et anaérobie est significativement différente entre les parcours plat et ascendant (Figures 3 et 4). L'organisme du cycliste possède une capacité maximale de production d'énergie, mais en fonction des caractéristiques du parcours, la répartition de l'énergie entre les système aérobie et anaérobie change.

De plus, les paramètres physiologiques en termes absolus sont les seuls qui permettent de prédire la performance sur le parcours plat (Tableau 6). Par contre, tous les paramètres physiologiques représentés en fonction du poids corporel permettent de prédire la performance sur le parcours ascendant (Tableau 6).

Mais la question se pose : est-ce que la nature de la variable dépendante choisie est la cause de ce résultat de corrélation? En effet, la réalisation de l'analyse de corrélation avec le temps des deux performances montre que le temps sur 20 km est corrélé seulement avec des paramètres relatifs, alors que le temps de 28 km est corrélé avec des paramètres absolus. En outre, l'analyse factorielle montre une distinction entre les paramètres aérobies relatifs et absolus. D'autres études ont montré aussi que les paramètres physiologiques représentés par rapport au poids du corps étaient toujours les meilleurs prédicteurs de la performance en endurance des cyclistes sur un parcours ascendant (Heil et coll., 2001) ou montagneux (Gregory et coll., 2007; d'Impellizzeri et coll., 2005a). Au contraire, Hawley et Noakes (1992) ont montré que les paramètres absolus sont les meilleurs prédicteurs sur un parcours plat, où la

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

corrélation de la PAM avec le temps de 20 km chez 19 cyclistes des deux sexes diminue de -0,91 à -0,68 si on change la PAM absolue par la PAM relative.

Pour la même puissance moyenne développée dans les deux épreuves, l'équation de régression multiple montre que les paramètres maximaux relatifs (PAM/r, VO_2/r) sont les prédicteurs de la performance sur le parcours ascendant, par contre, sur le parcours plat, le (SL1) qui est un paramètre aérobie sous-maximal absolu est le plus important (équation 1). Dans les deux équations, l'EE se trouve avec une forte pondération, car c'est le paramètre qui rend compte de la production efficace d'énergie mécanique (Joyner et Coyle, 2008).

Donc, les caractéristiques du terrain sont une variable à prendre en considération lors de l'analyse physiologique de la performance, car elles peuvent interagir avec les systèmes énergétiques mis en œuvre au cours de l'épreuve, et la nature des paramètres physiologiques sollicités (relatif ou absolu et maximal ou sous-maximal). Il serait très intéressant de savoir, si le niveau d'entraînabilité des cyclistes influence le mode de recrutement des paramètres physiologiques au cours de la performance en endurance des athlètes. Mais, sur le plan pratique, notre recherche montre que l'utilisation de la puissance relative au poids du corps est meilleure pour évaluer le niveau de l'athlète et pour programmer les séances d'entraînement en côte ou de mieux suivre la performance si elle est réalisée sur un parcours varié.

Limites de l'étude

L'utilisation du Computrainer nous permet de simuler les conditions de la

performance réelle (résistance variable, utilisation du vélo personnel, présence de compétiteurs), mais elle ne nous permet pas d'avoir une distance reproductible de celle des parcours réels (Peveler, 2013).

Dans notre recherche, il n'était pas possible de relativiser les paramètres physiologiques en ajoutant le poids du vélo à celui du cycliste, car lorsqu'on fixe le vélo du participant sur le Computrainer, le poids du vélo devient supporté par l'appareil même.

Le test de 3min^{SM} avec l'ergocycle de Lode permet d'estimer la capacité anaérobie comme la puissance critique (PC) (Burnley et coll., 2006; Vanhatalo et coll., 2007), mais en réalisant le test avec le Computrainer, seule la capacité anaérobie peut être estimée. En effet, dans notre recherche, nous n'étions pas capables de corréler la PC avec la performance des cyclistes sur un parcours ascendant, car à notre connaissance deux recherches dans la littérature ont corrélé la PC avec la performance en endurance des cyclistes, performance réalisée seulement sur des parcours plats (Black et coll., 2013; Smith et coll., 1999)

Conclusion

Contrairement à ce qui est montré en course à pied, la puissance et la capacité anaérobie influencent négativement la performance en endurance des cyclistes lorsque le parcours est ascendant. Pour les performances en endurance des cyclistes sur un parcours plat, le système anaérobie n'a aucun effet significatif dans la prédiction de la performance.

Comme la durée et la distance du parcours, les caractéristiques du terrain influencent nettement les systèmes énergétiques et la nature des paramètres physiologiques (relatif ou absolu et maximal ou sous-maximal) mis en œuvre pour réaliser la meilleure performance. En outre, plus le ratio entre les paramètres aérobies et le poids du corps est élevé, plus le cycliste est capable de réaliser une meilleure performance sur des parcours ascendants, par contre c'est plutôt la puissance brute qui compte sur les parcours plats.

Référence :

Baldari, C., Bonavolontà, V., Emerenziani, G. P., Gallotta, M. C., Silva, A. J., & Guidetti, L. (2009). Accuracy, reliability, linearity of Accutrend and Lactate Pro versus EBIO plus analyzer. European Journal of Applied Physiology, 107(1), 105-111.

Bar-Or, O. (1987). The Wingate Anaerobic Test. An update on methodology, reliability and validity. Sports Medicine, 4(6), 381-394.

Baron, R. (2001). Aerobic and anaerobic power characteristics of off-road cyclists. Medicine and Science in Sports and Exercise, 33(8), 1387-1393.

Baumann, C. W., Rupp, J. C., Ingalls, C. P., & Doyle, J. A. (2012). Anaerobic work capacity's contribution to 5-km-race performance in female runners. International Journal of Sports Physiology & Performance, 7(2), 170-174.

Bergström, H. C., Housh, T. J., Zuniga, J. M., Camic, C. L., Traylor, D. A., Schmidt, R. J., & Johnson, G. O. (2012). A new single work bout test to estimate critical power and anaerobic work capacity. The Journal of Strength & Conditioning Research, 26(3), 656-663.

Bertucci, W., Duc, S., Villerius, V., Pernin, J.-N., & Grappe, F. (2005). Validity and reliability of the PowerTap mobile cycling powermeter when compared with the SRM device. International Journal of Sports Medicine, 26(10), 868-873.

Black, M. I., Durant, J., Jones, A. M., & Vanhatalo, A. (2013). Critical power derived from a 3-min all-out test predicts 16.1-km road time-trial performance. European Journal of Sport Science.

Bulbulian, R., Wilcox, A. R., & Darabos, B. L. (1986). Anaerobic contribution to distance running performance of trained cross-country athletes. Medicine and Science in Sports and Exercise, 18(1), 107-113.

Burnley, M., Davison, G., & Baker, J. R. (2011). Effects of priming exercise on VO_2 kinetics and the power-duration relationship. Medicine and Science in Sports and Exercise, 43(11), 2171-2179.

Burnley, M., Doust, J. H., & Vanhatalo, A. (2006). A 3-min all-out test to determine peak oxygen uptake and the maximal steady state. Medicine and Science in Sports and Exercise, 38(11), 1995-2003.

Cane, J., Seidman, B., Sowash, J., Otto, R., & Wygand, J. (1996). A comparison of the computrainer load simulator and traditional cycle ergometry 1239. Medicine and Science in Sports and Exercise, 28(5), 208.

Costa, V., & Fernando, D.-O. (2008). Physiological variables to predict performance in cross-coutry mountain bike races. Journal of Exercise Physiology Online, 11(6).

Dekerle, J., Vanhatalo, A., & Burnley, M. (2008). Determination of critical power from a single test. Science & Sports, 23(5), 231-238.

de Lucas, R. D., Greco, C. C., Dekerle, J., Caritá, R. A. C., Guglielmo, L. G. A., & Denadai, B. S. (2014). Test–retest reliability of a 3-min isokinetic all-out test using two different cadences. Journal of Science and Medicine in Sport, 17(6), 645-649.

Faisal, A., Beavers, K. R., Robertson, A. D., & Hughson, R. L. (2009). Prior moderate and heavy exercise accelerate oxygen uptake and cardiac output kinetics in endurance athletes. Journal of Applied Physiology, 106(5), 1553-1563.

Faria, E. W., Parker, D. L., & Faria, I. E. (2005a). The science of cycling. Sports Medicine, 35(4), 285-312.

Faria, E. W., Parker, D. L., & Fria, I. E. (2005b). The science of cycling: factors affecting performance. Part 2. Sports Medicine, 35(4), 313-337.

Faude, O., Kindermann, W., & Meyer, T. (2009). Lactate threshold concepts. Sports Medicine, 39(6), 469-490.

Francis, J. T., Jr., Quinn, T. J., Amann, M., & LaRoche, D. P. (2010). Defining intensity domains from the end power of a 3-min all-out cycling test. Medicine and Science in Sports and Exercise, 42(9), 1769-1775.

Gardner, A. S., Stephens, S., Martin, D. T., Lawton, E., Lee, H., & Jenkinds, D. (2004). Accuracy of SRM and power tap power monitoring systems for bicycling. Medicine and Science in Sports and Exercise, 36(7), 1252-1258.

Gastin, P. B., & Lawson, D. L. (1994). Variable resistance all-out test to generate accumulated oxygen deficit and predict anaerobic capacity. European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology, 69(4), 331-336.

Gregory, J., Johns, D. P., & Walls, J. T. (2007). Relative vs. absolute physiological measures as predictors of mountain bike cross-country race performance. The Journal of Strength & Conditioning Research, 21(1), 17-22.

Hachana, Y., Attia, A., Nassib, S., Shephard, R. J., & Chelly, M. S. (2012). Test-retest reliability, criterion-related validity, and minimal detectable change of score on an abbreviated Wingate test for field sport participants. The Journal of Strength & Conditioning Research, 26(5), 1324-1330.

Hawley, J. A., & Noakes, T. D. (1992). Peak power output predicts maximal oxygen uptake and performance time in trained cyclists. European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology, 65(1), 79-83.

Heil, D. P., Murphy, O. F., Mattingly, A. R., & Higginson, B. K. (2001). Prediction of uphill time-trial bicycling performance in humans with a scaling-derived protocol. European Journal of Applied Physiology, 85(3-4), 374-382.

Houmard, J. A., Costill, D. L., Mitchell, J. B., Park, S. H., & Chenier, T. C. (1991). The role of anaerobic ability in middle distance running performance. European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology, 62(1), 40-43.

Impellizzeri, F. M., & Marcora, S. M. (2007). The physiology of mountain biking. Sports Medicine, 37(1), 59-71.

Impellizzeri, F. M., Rampinini, E., Sassi, A., Mognoni, P., & Marcora, S. (2005). Physiological correlates to off-road cycling performance. Journal of Sports Sciences, 23(1), 41-47.

Inoue, A., Sa Filho, A. S., Mello, F. C., & Santos, T. M. (2012). Relationship between anaerobic cycling tests and mountain bike cross-country performance. Journal of Strength and Conditioning Research, 26(6), 1589-1593.

Johnson, T. M., Sexton, P. J., Placek, A. M., Murray, S. R., & Pettitt, R. W. (2011). Reliability analysis of the 3-min all-out exercise test for cycle ergometry. Medicine and Science an Sports and Exercise, 43(12), 2375-2380.

Jones, A. M., & Carter, H. (2000). The effect of endurance training on parameters of aerobic fitness. Sports Medicine, 29(6), 373-386.

Joyner, M. J., & Coyle, E. F. (2008). Endurance exercise performance: the physiology of champions. The Journal of physiology, 586(1), 35-44.

Medbø, J. I., Mamen, A., & Beltrami, F. G. (2012). Examination of the Moxus Modular Metabolic System by the Douglas-bag technique. Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism, 37(5), 860-871.

Nagle, K. B., & Brooks, M. A. (2011). A Systematic Review of Bone Health in Cyclists. Sports Health, 3(3), 235-243.

Noordhof, D. A., Skiba, P. F., & de Koning, J. J. (2013). Determining anaerobic capacity in sporting Activities. International Journal of Sports Physiology & Performance, 8(5), 475-482.

Nummela, A. T., Paavolainen, L. M., Sharwood, K. A., Lambert, M. I., Noakes, T. D., & Rusko, H. K. (2006). Neuromuscular factors determining 5 km running performance and running economy in well-trained athletes. European Journal of Applied Physiology, 97(1), 1-8.

Paavolainen, L., Hakkinen, K., Hamalainen, I., Nummela, A., & Rusko, H. (1999). Explosive-strength training improves 5-km running time by improving running economy and muscle power. Journal of Applied Physiology, 86(5), 1527-1533.

Peveler, W. W. (2013). The accuracy of simulated indoor time trials utilizing a computrainer and GPS Data. The Journal of Strength & Conditioning Research, 27(10), 2823-2827.

Pyne, D. B., Boston, T., Martin, D. T., & Logan, A. (2000). Evaluation of the Lactate Pro blood lactate analyser. European Journal of Applied Physiology, 82(1-2), 112-116.

Richard Davison, R., Swan, D., Coleman, D., & Bird, S. (1999). Correlates of simulated hill climb cycling performance. Journal of Sports Sciences, 18(2), 105-110.

Rivera, P. D., & McGregor, S. J. (2005). Validity and reliability of computrainerTM and powertapTM power meters during incremental and steady state exercise: 140 Board #47 9:30 AM - 11:00 AM. Medicine and Science in Sports and Exercise, 37(5), S22.

Rosdahl, H., Lindberg, T., Edin, F., & Nilsson, J. (2013). The Moxus modular metabolic system evaluated with two sensors for ventilation against the Douglas bag method. European Journal of Applied Physiology, 113(5) 1353-1367.

Scofield, K. L., & Hecht, S. (2012). Bone health in endurance athletes: runners, cyclists, and swimmers. Current Sports Medicine Reports, 11(6), 328-334.

Sinnett, A. M., Berg, K., Latin, R. W., & Noble, J. M. (2001). The relationship between field tests of anaerobic power and 10-km run performance. Journal of Strength and Conditioning Research, 15(4), 405-412.

Smith, J., Dangelmaier, B., & Hill, D. (1999). Critical power is related to cycling time trial performance. International Journal of Sports Medicine, 20(06), 374-378.

Sunde, A., Støren, Ø., Bjerkaas, M., Larsen, M. H., Hoff, J., & Helgerud, J. (2010). Maximal strength training improves cycling economy in competitive cyclists. The Journal of Strength & Conditioning Research, 24(8), 2157-2165.

Tanner, R. K., Fuller, K. L., & Ross, M. L. (2010). Evaluation of three portable blood lactate analysers: Lactate Pro, Lactate Scout and Lactate Plus. European Journal of Applied Physiology, 109(3), 551-559.

Tharp, L., Berg, K., Latin, R. W., & Stuberg, W. (1997). The relationship of aerobic and anaerobic power to distance running performance. Research in Sports Medicine: An International Journal, 7(3-4), 215-225.

Vanhatalo, A., Doust, J. H., & Burnley, M. (2007). Determination of critical power using a 3-min all-out cycling test. Medicine and Science in Sports And Exercise, 39(3), 548-555.

Wharton, R. L., Alejandro; Earnest, Conrad Facsm. (2004). Applicability of an electronically braked training device versus a laboratory cycling ergometer. Medicine and Science in Sports and Exercise, 36(5), S253-S254.

6. DISCUSSION GÉNÉRALE

Les paramètres anaérobies et la performance (Wingate 30 s vs 3min^{SM}) :

Même si le Wingate 30s sous-estime la capacité anaérobie (puissance moyenne développée sur 30s), Davison et coll. (1999) ont montré que la PM/r de Wingate 30s est négativement corrélée avec le temps sur des courtes distances de 1 et 6 km à 12 et 6% d'élévation, respectivement. Autrement dit, le pourcentage de la capacité anaérobie évalué par le test Wingate 30s est positivement associé à la performance sur 1 et 6 km. Par contre, dans notre recherche, au cours de la performance de 20km, la capacité anaérobie est négativement corrélée à la performance dès les premiers 4 km. Cette contradiction est peut-être liée à la méthode d'estimation de la capacité anaérobie pour nos deux tests (3min^{SM} vs Wingate 30s). En effet, le métabolisme aérobie contribue de 16 à 44% à la PM de Wingate 30 s (Davidson et coll., 1999; Gastin et Lawson; 1994; Hachana et coll., 2012) qui est considérée comme un indice de la capacité anaérobie (Bar-Or, 1987). Par contre, le concept de calcul de la capacité anaérobie avec le 3min^{SM} soustrait presque toutes sortes de travail aérobie au cours du test. Car la PF du test de 3min^{SM} reflète la puissance à laquelle le système aérobie travaille à son maximum, donc tout travail réalisé au-dessus de cette puissance provient du système anaérobie (Jones et coll, 2008).

Afin de valider cette hypothèse, nous avons corrélé la puissance moyenne des 30 premières secondes de 3min^{SM} avec la PM/r de 20 km et la corrélation est devenue significativement positive ($r = 0,75$; $p<0,01$). Même en remplaçant la PM/r de 20 km par

Rapport-Gratuit.com

le temps réalisé, le r de Pearson ($r = -0,60$; $p<0,05$) confirme que la PM/r de 30s (capacité anaérobie Wingate 30s) est un paramètre favorable à la performance en endurance chez des cyclistes grimpeurs. Donc, en utilisant le même concept du test Wingate, la capacité anaérobie devient un paramètre favorable à la performance en endurance et nos résultats deviennent en accord avec ceux de Davison et coll. (1999).

Non seulement le test de Wingate 30s sous-estime la puissance pic ou la capacité anaérobie (Baron, 2001; Bar-Or, 1987; Gastin et Lawson, 1994), mais de plus il n'est pas valide à estimer la capacité anaérobie, ce qui engendre de fausses interprétations physiologiques. Mais, il faut mentionner que le Wingate 30s peut être utilisé afin de prédire la performance (Davison et coll., 1999).

Le choix de la variable dépendante ;

Dans notre recherche, la puissance moyenne développée au cours de l'épreuve a été choisie comme variable dépendante (à prédire) au lieu du temps réalisé, car notre objectif est de chercher les paramètres physiologiques qui expliquent la variation de la puissance développée au cours de la performance des cyclistes, plutôt que la prédiction du temps de la performance.

En effet, la corrélation ou la régression multiple des paramètres physiologiques avec la performance exprimée en termes de PM ou de vitesse moyenne (course à pied) est plus fidèle pour expliquer la réponse des paramètres physiologiques au cours de la compétition. En effet, le temps est une expression ambigüe et générale de la performance, dont plusieurs facteurs autres que physiologiques contribuent au produit du temps réalisé au cours de la compétition réelle.

Dans la recherche de Richard Davidson et coll. (1999) la puissance moyenne relative développée sur 1 km et 6 km avec des pentes de 12% et 6% respectivement, sur un tapis roulant représente fortement la performance en terme du temps réalisé (PM & temps, 1 km : r = -0,92; 6 km : r = -0,95). Par contre dans notre recherche la PM/r de 20 km était moins corrélée avec le temps à -0,77. D'autre part, la PM de 28 km était significativement corrélée avec le temps à -0,67. Autrement dit, la puissance moyenne développée par nos participants au cours des deux performances ne représente pas assez fortement le temps réalisé comme chez Davidson et coll. (1999). La longueur de la distance étudiée dans notre recherche cause-t-elle la différence au niveau de la puissance de corrélation observée dans les résultats de Richard Davidson et coll. (1999) et nos résultats (r = -0,92 et -0,95 vs r = -0,77 et -0,67)?

En effet, la stabilité ou même la légère augmentation (0,03) de la corrélation de la PM et du temps entre 1 et 6 km confond cette dernière hypothèse. Par contre, la différence des deux protocoles de performance réalisés peut expliquer cette dissemblance. En effet, Richard Davidson et coll. (1999) utilisèrent un tapis roulant sur lequel le cycliste pédale avec son vélo. Pour réussir l'épreuve le cycliste doit toujours développer la puissance nécessaire pour suivre le rythme imposé par le tapis. Par contre, dans notre cas la performance est plus réelle où le sujet est libre, où la résistance est variée selon la section de la piste, donc le cycliste peut organiser librement son effort tout au long de la performance selon sa capacité afin de réaliser sa meilleure performance. Par conséquent, d'autres facteurs que la puissance développée déterminent le temps réalisé, tel que le technique, l'expérience, la psychologie du cycliste, et beaucoup d'autres facteurs mis en jeu.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Deuxièmement, le choix de la nature de la puissance moyenne (absolue ou relative) pour chaque performance était basé sur leur corrélation avec le temps, car ce n'est pas toujours la puissance moyenne absolue qui est le bon indice de la performance comme nos résultats le montrent. Dans une recherche où la performance est plus contrôlée, Davidson et coll. (1999) ont montré que la PM est faiblement corrélée avec la performance de 1 et 6 km à 12 et 6% d'élévation sur tapis roulant (1 km r = -0,15; 6 km r = -0,42). Par contre son expression en terme relatif la corrélation de 1 km monte à -0,92 et celle de 6 km monte à -0,95.

À titre d'exemple, comme les deux tableaux ci-dessous le montrent, les athlètes « A » et « B » ont pratiquement la même contribution du système aérobie avec le même poids, mais du fait que l'athlète « A » est plus performant sur le plan anaérobie (W'/r), sa performance sur le parcours ascendant (PM/r.20km) était moins bonne que celle de l'athlète « B ». Le deuxième tableau montre aussi le même effet du système anaérobie sur la performance en endurance ascendante avec les deux meilleurs athlètes de cette étude.

Deux athlètes moyens

Athlète	Poids	PAM/r	VO2/r	SL1/r	SL2/r	EE/r	PP/r	W'/r	PM/r.20km
A	71,5	3,50	50,55	2,41	2,94	2,29	**29,89**	**538,56**	3,14
B	72,1	3,88	50,35	2,22	2,88	2,87	**30,08**	**237,76**	3,37

Deux athlètes les plus forts

Athlète	Poids	PAM/r	VO2/r	SL1/r	SL2/r	EE/r	PP/r	W'/r	PM/r.20km
C	61,8	5,66	77,38	3,82	4,11	3,84	**17,42**	**210,79**	4,12
D	57,4	5,40	71,87	3,79	4,15	3,75	**17,52**	**242,02**	3,83

Cependant, nos résultats sont en contradiction avec les études qui traitent de la

contribution du métabolisme anaérobie avec la performance en endurance des cyclistes de montagne d'un côté et de la course à pied d'un autre côté.

Cependant, nos résultats sont en contradiction avec les études qui traitent de la contribution du métabolisme anaérobie avec la performance en endurance des cyclistes de montagne d'un côté et de la course à pied d'un autre côté.

La reproductibilité du 3min^{SM} :

Il est montré que les mesures effectuées sur Computrainer sont reproductibles (Cane et coll., 1996; Peveler, 2013), mais il n'y a pas encore de recherches qui montrent la reproductibilité du 3min supramaximal réalisé sur le Computrainer (3min^{SM}), comme il été réalisé sur l'ergocycle électromagnétique « Lode » (Johnson et coll., 2011) ou sur l'ergocycle isocinétique « SRM » (Dekerle et coll., 2014; de Lucas et coll., 2014). Cependant, nos résultats montrent indirectement que le 3min^{SM} réalisé sur le Computrainer est reproductible et appuient la prédiction des autres paramètres physiologiques à travers le 3min^{SM}. En effet, Francis et coll. (2010) ont créé des modèles de régression afin d'estimer la puissance associée au SL1, OBLA, et la PAM à travers la puissance moyenne calculée dans les 30 dernières secondes du 3min^{SM}. L'application des coefficients développés par Francis et coll. (2010) montre que les paramètres estimés par la puissance finale de 3min^{SM} sont similaires de ceux déterminés par le test PAM, (SL1 : 195,41 ± 24,63 w vs SL1. 3min^{SM} : 209,86 ± 26,14 ; p = 0,08), (OBLA : 228,09 ± 25,51 vs OBLA.3min^{SM} : 237,83 ± 29,62; p=0,23), et (PAM : 296,92 ± 32,76 vs PAM.3min^{SM} : 293,80 ± 36,60; p=0,67).

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

La prédiction de la performance :

Puisqu'on a déterminé tous les paramètres aérobies et anaérobies, nous avons essayé de prédire la performance en termes de temps. Mais, la prédiction des résultats a été faible, car le coefficient de variation (CV) du temps des deux performances étaient petites 28 km : 2913,84 ± 126,38 s (CV = 4,33%) et 20 km : 2695,88 ± 153,87s (CV = 5,7%). En effet, il est recommandé de ne pas utiliser seulement des cyclistes d'élite ou un groupe très homogène afin de prédire la performance, car la variation de la performance est souvent petite, et par conséquent les chances d'avoir des corrélations avec les paramètres physiologiques deviennent parfois impossibles et non explicables, comme dans notre cas. Costa et Fernando (2008) ont trouvé que seule la PAM/r était corrélée avec la performance de cyclisme de montagne sur 31,5 et 28 km avec 6 cyclistes d'élite. Pourtant tous les paramètres aérobies et anaérobies avaient aussi été déterminés. En effet, les CV des deux performances ont été 3,15%, et 8,15%, respectivement. De même, Impellizzeri et coll. (2005b) ont trouvé que seulement deux paramètres aérobies parmi les 6 évalués ont été faiblement corrélés (r = -0,63 et -0,66) avec la performance de 12 cyclistes de montagne d'élite sur une distance de 33,6 km. En outre, la corrélation de ces deux paramètres n'était possible qu'en les exprimant en terme relatif.

L'analyse factorielle des paramètres physiologiques :

À notre connaissance, nous n'avons pas trouvé de recherche qui a appliqué l'analyse des composantes principale sur autant des paramètres aérobies et anaérobies.

Cette analyse est utilisée comme un outil exploratoire de la structure sous-jacente des données ou comme un outil confirmatoire de la répartition des données. En effet, dans notre recherche cette analyse nous a permis de vérifier que les paramètres aérobies relatifs sont différents des paramètres aérobies absolus, ce qui n'était pas attendu. D'autre part, cette analyse a confirmé que les paramètres du système anaérobie (PP et W') sont complètement différents de tous les paramètres aérobies maximaux (PAM, VO_2max) et sous-maximaux (EE, SL1, et SL2) (Billat, 2003; Wilmore et Costill, 2003).

L'analyse de régression linéaire multiple :

L'utilisation des équations de la régression multiple linéaire pour expliquer les principales variables prédictrices de la variable à prédire doit être fait d'une manière prudente.

Dans notre étude, l'équation 2 (PM/r 20 km = 2,744 + (PAM/r x 1,273) + (VO_2/r x -0,015) + (EE/r x -1,154) + (W/r x -0,001) + 0,054) montre que le VO_2max/r et l'EE/r sont des paramètres qui limitent la performance, car leur pondération est négative (-0.015 et -1.154). Pourtant, ces deux paramètres présentent une corrélation positive forte avec la PM/r de 20km ($r = 0,80$ et $r = 0,84$; $p<0,001$). Donc, le VO_2max/r et l'EE/r sont deux principaux paramètres favorables à la performance, mais ils jouent le rôle des variables rectificatrices de la prédiction dans l'équation. En effet, la somme de pondération de ces deux paramètres est inférieure à celle de la PAM/r (1,273 > (-0,015) + (-1,154)). De plus, le résultat de l'analyse factorielle (Tableau 4) montre que la PAM/r est le facteur principal de tous les paramètres aérobies, et qu' il y a une forte corrélation positive entre la PAM/r avec le VO_2max/r et l'EE/r ($r = 0,89$; $r = 0,97$), donc

l'amélioration de l'un de ces deux paramètres aérobie améliore la PAM/r et par conséquent, il améliore la performance. Mais, la W'/r influence négativement la performance, car 1) sa pondération est négative, 2) il constitue seul un facteur, et 3) sa corrélation avec la performance est négative. Pour la performance en endurance de 28 km, il semblait que l'EE et le SL1 sont les principaux paramètres qui expliquent 89% de la variation de la PM de 28 km (Équation 1 : PM 28 km = (SL1 x 0,476) + (EE x 0,872) + 983,21). Car, 1) leur pondération est positive, et 2) ils sont corrélés positivement au variable à prédire (SL1 : r = 0,84; EE : r = 0,91).

Donc, il est important d'accompagner l'analyse des équations de régression linéaire multiple avec la corrélation entre les paramètres prédicteurs et le paramètre à prédire.

7. RÉFÉRENCES GÉNÉRALES

Abbiss, C. R., Peiffer, J. J., & Laursen, P. B. (2009). Optimal cadence selection during cycling. International SportMed Journal, 10(1), 1-15.

Bailey, S. J., Vanhatalo, A., Wilkerson, D. P., DiMenna, F. J., & Jones, A. M. (2009). Optimizing the "priming" effect: influence of prior exercise intensity and recovery duration on O2 uptake kinetics and severe-intensity exercise tolerance. Journal of Applied Physiology, 107(6), 1743-1756.

Baumann, C. W., Rupp, J. C., Ingalls, C. P., & Doyle, J. A. (2012). Anaerobic work capacity's contribution to 5-km-race performance in female runners. International Journal of Sports Physiology & Performance, 7(2), 170-174.

Bar-Or, O. (1987). The Wingate Anaerobic Test. An update on methodology, reliability and validity. Sports Medicine, 4(6), 381-394.

Barker, A. R., Bond, B., Toman, C., Williams, C. A., & Armstrong, N. (2012). Critical power in adolescents: physiological bases and assessment using all-out exercise. European Journal of Applied Physiology, 112(4), 1359-1370.

Barker, T., Poole, D. C., Noble, M. L., & Barstow, T. J. (2006). Human critical power–oxygen uptake relationship at different pedalling frequencies. Experimental Physiology, 91(3), 621-632.

Baron, R. (2001). Aerobic and anaerobic power characteristics of off-road cyclists. Medicine and Science in Sports and Exercise, 33(8), 1387-1393.

Baron, B., Dekerle, J., Robin, S., Neviere, R., Dupont, L., Matran, R., et coll. (2003). Maximal lactate steady state does not correspond to a complete physiological steady state. International Journal of Sports Medicine, 24(8), 582-587.

Baumann, C. W., Rupp, J. C., Ingalls, C. P., & Doyle, J. A. (2012). Anaerobic work capacity's contribution to 5-km-race performance in female runners. International Journal of Sports Physiology & Performance, 7(2), 170-174.

Bentley, D. J., Wilson, G. J., Davie, A. J., & Zhou, S. (1998). Correlations between peak power output, muscular strength and cycle time trial performance in triathletes. Journal of Sports Medicine and Physical Fitness, 38(3), 201-207.

Bergström, H. C., Housh, T. J., Zuniga, J. M., Camic, C. L., Traylor, D. A., Schmidt, R. J., & Johnson, G. O. (2012). A new single work bout test to estimate critical power and anaerobic work capacity. The Journal of Strength & Conditioning Research, 26(3), 656-663.

Bergström, H. C., Housh, T. J., Zuniga, J. M., Traylor, D. A., Lewis, R. W., Camic, C. L.,. Johnson, G. O. (2013a). Responses during exhaustive exercise at critical power determined from the 3-min all-out test. Journal of Sports Sciences, 31(5), 537-545.

Bergström, H. C., Housh, T. J., Zuniga, J. M., Traylor, D. A., Lewis, R. W., Camic, C. L.,. Johnson, G. O. (2013c). Metabolic and neuromuscular responses at critical power from the 3-min all-out test. Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism, 38(1), 7-13.

Bergström, H. C., Housh, T. J., Zuniga, J. M., Traylor, D. A., Lewis, R. W., Jr., Camic, C. L., Johnson, G. O. (2013b). Mechanomyographic and metabolic responses during continuous cycle ergometry at critical power from the 3-min all-out test. Journal of Electromyography and Kinesiology, 23(2), 349-355.

Bertucci, W., Grappe, F., Girard, A., Betik, A., & Rouillon, J. D. (2005). Effects on the crank torque profile when changing pedalling cadence in level ground and uphill road cycling. Journal of Biomechanics, 38(5), 1003-1010.

Bhambhani, Y. N., Kennedy, M. D., & Maikala, R. V. (2010). Cardiorespiratory and vastus lateralis oxygenation-blood volume responses during incremental and modified Wingate's test . International Journal of Industrial Ergonomics, 40(2), 197-205.

Billat, V. (2003). Physiologie et méthodologie de l'entraînement: de la théorie à la pratique: De Boeck Supérieur, Bruxelles.

Black, M. I., Durant, J., Jones, A. M., & Vanhatalo, A. (2014). Critical power derived from a 3-min all-out test predicts 16.1-km road time-trial performance. European Journal of Sport Science, *14*(3), 217-223.

Brickley, G., Dekerle, J., Hammond, A. J., Pringle, J., & Carter, H. (2007). Assessment of maximal aerobic power and critical power in a single 90-s isokinetic all-out cycling test. International Journal of Sports Medicine, 28(5), 414-419.

Buchheit, M., & Laursen, P. B. (2013). High-intensity interval training, solutions to the programming puzzle. Sports Medicine, 43(5), 313-338.

Bulbulian, R., Wilcox, A. R., & Darabos, B. L. (1986). Anaerobic contribution to distance running performance of trained cross-country athletes. Medicine & Science in Sports & Exercise, 18(1), 107-113.

Burnley, M., Davison, G., & Baker, J. R. (2011). Effects of priming exercise on VO_2 kinetics and the power-duration relationship. Medicine & Science in Sports & Exercise, 43(11), 2171-2179.

Burnley, M., Doust, J. H., & Vanhatalo, A. (2006). A 3-min all-out test to determine peak oxygen uptake and the maximal steady state. Medicine and Science in Sports and Exercise, 38(11), 1995-2003.

Burnley, M., & Jones, A. M. (2007). Oxygen uptake kinetics as a determinant of sports performance. European Journal of Sport Science, 7(2), 63-79.

Cannon, D., Kolkhorst, F., & Cipriani, D. (2007). Effect of pedaling technique on muscle activity and cycling efficiency. European Journal of Applied Physiology, 99(6), 659-664.

Cleland, S. M., Murias, J. M., Kowalchuk, J. M., & Paterson, D. H. (2012). Effects of prior heavy-intensity exercise on oxygen uptake and muscle deoxygenation kinetics of a subsequent heavy-intensity cycling and knee-extension exercise. Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism, 37(1), 138-148.

Cole, M., Coleman, D., Hopker, J., & Wiles, J. (2014). Improved gross efficiency during long duration submaximal cycling following a short-term high carbohydrate diet. International Journal of Sports Medicine, 35(3), 265-269.

Costa, V., & Fernando, D.-O. (2008). Physiological variables to predict performance in cross-coutry mountain bike races. Journal of Exercise Physiology Online, 11(6).

Coyle, E., Feltner, M., Kautz, S., Hamilton, M., Montain, S., Baylor, A., Petrek, G. (1991). Physiological and biomechanical factors associated with elite endurance cycling performance. Medicine and Science in Sports and Exercise, 23(1), 93-107.

Coyle, E. F. (2005). Improved muscular efficiency displayed as Tour de France champion matures. Journal of Applied Physiology, 98(6), 2191-2196.

Coyle, E. F., Coggan, A. R., Hopper, M., & Walters, T. J. (1988). Determinants of endurance in well-trained cyclists. Journal of Applied Physiology, 64(6), 2622-2630.

Coyle, E. F., Sidossis, L. S., Horowitz, J. F., & Beltz, J. D. (1992). Cycling efficiency is related to the percentage of type I muscle fibers. Medicine and Science in Sports and Exercise, 24(7), 782-788.

Rapport-Gratuit.com

Dekerle, J., Baron, B., Dupont, L., Vanvelcenaher, J., & Pelayo, P. (2003). Maximal lactate steady state, respiratory compensation threshold and critical power. European Journal of Applied Physiology, 89(3-4), 281-288.

Dekerle, J., Brickley, G., Hammond, A. J. P., Pringle, J. S. M., & Carter, H. (2006). Validity of the two-parameter model in estimating the anaerobic work capacity. European Journal of Applied Physiology, 96(3), 257-264.

Dekerle, J., Vanhatalo, A., & Burnley, M. (2008). Determination of critical power from a single test. Science & Sports, 23(5), 231-238.

De Pauw, K., Roelands, B., Cheung, S. S., De Geus, B., Rietjens, G., & Meeusen, R. (2013). Guidelines to classify subject groups in sport-science research. International Journal of Sports Physiology and Performance, 8(2), 111-122.

DeLorey, D. S., Kowalchuk, J. M., Heenan, A. P., Dumanoir, G. R., & Paterson, D. H. (2007). Prior exercise speeds pulmonary O2 uptake kinetics by increases in both local muscle O2 availability and O2 utilization. Journal of Applied Physiology, 103(3), 771-778.

Dumke, C. L., McBride, J. M., Nieman, D. C., Gowin, W. D., Utter, A. C., & McAnulty, S. R. (2007). Effect of duration and exogenous carbohydrate on gross efficiency during cycling. Journal of Strength & Conditioning Research, 21(4), 1214-1219.

Endo, M., Usui, S., Fukuoka, Y., Miura, A., Rossiter, H. B., & Fukuba, Y. (2004). Effects of priming exercise intensity on the dynamic linearity of the pulmonary VO(2) response during heavy exercise. European Journal of Applied Physiology, 91(5-6), 545-554.

Faisal, A., Beavers, K. R., Robertson, A. D., & Hughson, R. L. (2009). Prior moderate and heavy exercise accelerate oxygen uptake and cardiac output kinetics in endurance athletes. Journal of Applied Physiology, 106(5), 1553-1563.

Faria, E. W., Parker, D. L., & Faria, I. E. (2005a). The science of cycling. Sports Medicine, 35(4), 285-312.

Faria, E. W., Parker, D. L., & Fria, I. E. (2005b). The science of cycling: factors affecting performance. Part 2. Sports Medicine, 35(4), 313-337.

Faude, O., Kindermann, W., & Meyer, T. (2009). Lactate threshold concepts. Sports Medicine, 39(6), 469-490.

Ferguson, C., Rossiter, H. B., Whipp, B. J., Cathcart, A. J., Murgatroyd, S. R., & Ward, S. A. (2010). Effect of recovery duration from prior exhaustive exercise on the

parameters of the power-duration relationship. Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985), 108(4), 866-874. doi: 10.1152/japplphysiol.91425.2008

Foster, C., & Lucia, A. (2007). Running economy. Sports Medicine, 37(4-5), 316-319.

Francis, J. T., Jr., Quinn, T. J., Amann, M., & LaRoche, D. P. (2010). Defining intensity domains from the end power of a 3-min all-out cycling test. Medicine and Science in Sports and Exercise, 42(9), 1769-1775.

Gaesser, G., & Wilson, L. (1988). Effects of continuous and interval training on the parameters of the power-endurance time relationship for high-intensity exercise. International Journal of Sports Medicine, 9(06), 417-421.

Gaesser, G. A., & Poole, D. C. (1996). The slow component of oxygen uptake kinetics in humans. Exercise & Sport Sciences Reviews, 24, 35-70.

Gaitanos, G. C., Williams, C., Boobis, L. H., & Brooks, S. (1993). Human muscle metabolism during intermittent maximal exercise. Journal of Applied Physiology, 75(2), 712-719.

Gastin, P. B., & Lawson, D. L. (1994). Variable resistance all-out test to generate accumulated oxygen deficit and predict anaerobic capacity. European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology, 69(4), 331-336.

Gregory, J., Johns, D. P., & Walls, J. T. (2007). Relative vs. absolute physiological measures as predictors of mountain bike cross-country race performance. The Journal of Strength & Conditioning Research, 21(1), 17-22.

Hachana, Y., Attia, A., Chaabène, H., Gallas, S., Sassi, R. H., & Dotan, R. (2012). Test-retest reliability and circadian performance variability of a 15-s Wingate Anaerobic Test. Biological Rhythm Research, 43(4), 413-421.

Hajoglou, A., Foster, C., De Koning, J. J., Lucia, A., Kernozek, T. W., & Porcari, J. P. (2005). Effect of warm-up on cycle time trial performance. Medicine and Science in Sports and Exercise, 37(9), 1608-1614.

Hawley, J. A., & Noakes, T. D. (1992). Peak power output predicts maximal oxygen uptake and performance time in trained cyclists. European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology, 65(1), 79-83.

Heil, D. P., Murphy, O. F., Mattingly, A. R., & Higginson, B. K. (2001). Prediction of uphill time-trial bicycling performance in humans with a scaling-derived protocol. European Journal of Applied Physiology, 85(3-4), 374-382.

Hill, D. W. (1993). The critical power concept. Sports Medicine, 16(4), 237-254.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Hill, D. W., Poole, D. C., & Smith, J. C. (2002). The relationship between power and the time to achieve VO_2max. Medicine and Science in Sports and Exercise, 34(4), 709-714.

Hill, D. W., & Smith, J. C. (1993). A comparison of methods of estimating anaerobic work capacity. Ergonomics, 36(12), 1495-1500.

Hopker, J. G., Coleman, D. A., & Wiles, J. D. (2007). Differences in efficiency between trained and recreational cyclists. Applied Physiology, Nutrition & Metabolism, 32(6), 1036-1042.

Houmard, J. A., Costill, D. L., Mitchell, J. B., Park, S. H., & Chenier, T. C. (1991). The role of anaerobic ability in middle distance running performance. European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology, 62(1), 40-43.

Impellizzeri, F. M., Ebert, T., Sassi, A., Menaspa, P., Rampinini, E., & Martin, D. T. (2008). Level ground and uphill cycling ability in elite female mountain bikers and road cyclists. European Journal of Applied Physiology, 102(3), 335-341.

Impellizzeri, F., Marcora, S., Rampinini, E., Mognoni, P., & Sassi, A. (2005b). Correlations between physiological variables and performance in high level cross country off road cyclists. British Journal of Sports Medicine, 39(10), 747-751.

Impellizzeri, F. M., & Marcora, S. M. (2007). The physiology of mountain biking. Sports Medicine, 37(1), 59-71.

Impellizzeri, F. M., Rampinini, E., Sassi, A., Mognoni, P., & Marcora, S. (2005a). Physiological correlates to off-road cycling performance. Journal of Sports Sciences, 23(1), 41-47.

Inoue, A., Sa Filho, A. S., Mello, F. C., & Santos, T. M. (2012). Relationship between anaerobic cycling tests and mountain bike cross-country performance. Journal of Strength and Conditioning Research, 26(6), 1589-1593.

Jenkins, D. G., & Quigley, B. M. (1991). The y-intercept of the critical power function as a measure of anaerobic work capacity. Ergonomics, 34(1), 13-22.

Jenkins, D. G., & Quigley, B. M. (1993). The influence of high-intensity exercise training on the W-T relationship. Medicine & Science in Sports & Exercise, 25(2), 275-282.

Johnson, T. M., Sexton, P. J., Placek, A. M., Murray, S. R., & Pettitt, R. W. (2011). Reliability analysis of the 3-min all-out exercise test for cycle ergometry. Medicine and Science in Sports and Exercise, 43(12), 2375-2380.

Jones, A. M. (1998). A five year physiological case study of an Olympic runner. British Journal of Sports Medicine, 32(1), 39-43.

Jones, A. M., & Carter, H. (2000). The effect of endurance training on parameters of aerobic fitness. Sports Medicine, 29(6), 373-386.

Jones, A. M., Vanhatalo, A., Burnley, M., Morton, R. H., & Poole, D. C. (2010). Critical power: implications for determination of VO_2max and exercise tolerance. Medicine and Science in Sports and Exercise, 42(10), 1876-1890.

Jones, A. M., Wilkerson, D. P., Burnley, M., & Koppo, K. (2003). Prior heavy exercise enhances performance during subsequent perimaximal exercise. Medicine and Science in Sports and Exercise, 35(12), 2085-2092.

Jones, A. M., Wilkerson, D. P., DiMenna, F., Fulford, J., & Poole, D. C. (2008). Muscle metabolic responses to exercise above and below the "critical power" assessed using 31P-MRS. American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology, 294(2), R585-R593.

Joyner, M. J., & Coyle, E. F. (2008). Endurance exercise performance: the physiology of champions. The Journal of Physiology, 586(1), 35-44.

Joyner, M. J., Ruiz, J. R., & Lucia, A. (2011). The two-hour marathon: who and when? Journal of Applied Physiology, 110(1), 275-277.

Lajoie, C., Laurencelle, L., & Trudeau, F. (2000). Physiological responses to cycling for 60 minutes at maximal lactate steady state. Canadian Journal of Applied Physiology, 25(4), 250-261.

Louis, J., Hausswirth, C., Easthope, C., & Brisswalter, J. (2012). Strength training improves cycling efficiency in master endurance athletes. European Journal of Applied Physiology, 112(2), 631-640.

Lucia, A., Hoyos, J., Perez, M., Santalla, A., & Chicharro, J. L. (2002). Inverse relationship between VO_2max and economy/efficiency in world-class cyclists. Medicine and Science in Sports and Exercise, 34(12), 2079-2084.

McClave, S. A., LeBlanc, M., & Hawkins, S. A. (2011). Sustainability of critical power determined by a 3-minute all-out test in elite cyclists. The Journal of Strength & Conditioning Research, 25(11), 3093-3098.

McLellan, T., & Cheung, K. S. (1992). A comparative evaluation of the individual anaerobic threshold and the critical power. Medicine and Science in Sports and Exercise, 24(5), 543-550.

Medbo, J., Mohn, A., Tabata, I., Bahr, R., Vaage, O., & Sejersted, O. (1988). Anaerobic capacity determined by maximal accumulated O_2 deficit. Journal of Applied Physiology, 64(1), 50-60.

Monod, H., & Scherrer, J. (1965). The work capacity of a synergic muscular group. Ergonomics, 8(3), 329-338.

Moritani, T., Nagata, A., Devries, H. A., & Muro, M. (1981). Critical power as a measure of physical work capacity and anaerobic threshold. Ergonomics, 24(5), 339-350.

Myers, J., & Ashley, E. (1997). Dangerous curves a perspective on exercise, lactate, and the anaerobic threshold. CHEST Journal, 111(3), 787-795.

Noakes, T. D. (2011). Time to move beyond a brainless exercise physiology: the evidence for complex regulation of human exercise performance. Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism 36(1), 23-35.

Nagle, K. B., & Brooks, M. A. (2011). A Systematic Review of Bone Health in Cyclists. Sports Health, 3(3), 235-243.

Noordhof, D. A., de Koning, J. J., & Foster, C. (2010). The maximal accumulated oxygen deficit method: a valid and reliable measure of anaerobic capacity? Sports Medicine, 40(4), 285-302.

Noordhof, D. A., Skiba, P. F., & de Koning, J. J. (2013). Determining anaerobic capacity in sporting activities. International Journal of Sports Physiology & Performance, 8(5), 475-482.

Noordhof, D. A., Vink, A. M. T., de Koning, J. J., & Foster, C. (2011). Anaerobic capacity: effect of computational method. International Journal of Sports Medicine, 32(6), 422-428.

Nummela, A. T., Paavolainen, L. M., Sharwood, K. A., Lambert, M. I., Noakes, T. D., & Rusko, H. K. (2006). Neuromuscular factors determining 5 km running performance and running economy in well-trained athletes. European Journal of Applied Physiology, 97(1), 1-8.

Paavolainen, L., Hakkinen, K., Hamalainen, I., Nummela, A., & Rusko, H. (1999). Explosive-strength training improves 5-km running time by improving running economy and muscle power. Journal of Applied Physiology, 86(5), 1527-1533.

Padilla, S., Mujika, I., Cuesta, G., & Goiriena, J. J. (1999). Level ground and uphill cycling ability in professional road cycling. Medicine and Science in Sports and Exercise, 31(6), 878-885.

Peveler, W. W., & Green, J. M. (2011). Effect of saddle height on economy and anaerobic power in well-trained cyclists. Journal of Strength & Conditioning Research, 25(3), 629-633.

Poole, D. C., Ward, S. A., Gardner, G.-W., & Whipp, B. J. (1988). Metabolic and respiratory profile of the upper limit for prolonged exercise in man. Ergonomics, 31(9), 1265-1279.

Poole, D. C., Ward, S. A., & Whipp, B. J. (1990). The effects of training on the metabolic and respiratory profile of high-intensity cycle ergometer exercise. European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology, 59(6), 421-429.

Pringle, J. S. M., & Jones, A. M. (2002). Maximal lactate steady state, critical power and EMG during cycling. European Journal of Applied Physiology, 88(3), 214-226.

Richard Davison, R., Swan, D., Coleman, D., & Bird, S. (1999). Correlates of simulated hill climb cycling performance. Journal of Sports Sciences, 18(2), 105-110.

Sallet, P., Mathieu, R., Fenech, G., & Baverel, G. (2006). Physiological differences of elite and professional road cyclists related to competition level and rider specialization. Journal of Sports Medicine & Physical Fitness, 46(3), 361-365.

Scofield, K. L., & Hecht, S. (2012). Bone health in endurance athletes: runners, cyclists, and swimmers. Current Sports Medicine Reports, 11(6), 328-334.

Shaw, A. J., Ingham, S. A., & Folland, J. P. (2014). The valid measurement of running economy in runners. Medicine and Science in Sports and Exercise, 46(10), 1968-1973.

Shephard, R. J. (2009). Is it time to retire the 'Central Governor'? Sports Medicine, 39(9), 709-721.

Sinnett, A. M., Berg, K., Latin, R. W., & Noble, J. M. (2001). The relationship between field tests of anaerobic power and 10-km run performance. Journal of Strength and Conditioning Research, 15(4), 405-412.

Smith, C. G. M., & Jones, A. M. (2001). The relationship between critical velocity, maximal lactate steady-state velocity and lactate turnpoint velocity in runners. European Journal of Applied Physiology, 85(1/2).

Stöggl, T., & Sperlich, B. (2014). Polarized training has greater impact on key endurance variables than threshold, high intensity, or high volume training. Frontiers in Physiology, 5.

Sunde, A., Støren, Ø., Bjerkaas, M., Larsen, M. H., Hoff, J., & Helgerud, J. (2010). Maximal strength training improves cycling economy in competitive cyclists. The Journal of Strength & Conditioning Research, 24(8), 2157-2165.

Talanian, J. L., Galloway, S. D., Heigenhauser, G. J., Bonen, A., & Spriet, L. L. (2007). Two weeks of high-intensity aerobic interval training increases the capacity for fat oxidation during exercise in women. Journal of Applied Physiology, 102(4), 1439-1447.

Tharp, L., Berg, K., Latin, R. W., & Stuberg, W. (1997). The relationship of aerobic and anaerobic power to distance running performance. Research in Sports Medicine: an International Journal, 7(3-4), 215-225.

Vanhatalo, A., Doust, J. H., & Burnley, M. (2007). Determination of critical power using a 3-min all-out cycling test. Medicine and Science in Sports and Exercise, 39(3), 548-555.

Vanhatalo, A., Fulford, J., DiMenna, F. J., & Jones, A. M. (2010). Influence of hyperoxia on muscle metabolic responses and the power–duration relationship during severe-intensity exercise in humans: a 31P magnetic resonance spectroscopy study. Experimental Physiology, 95(4), 528-540.

Wilmore, J. H., & Costill, D. L. (2002). Physiologie du sport et de l'exercice. Edition De Boeck Université.

Xu, F., & Rhodes, E. C. (1999). Oxygen uptake kinetics during exercise. Sports Medicine, 27(5), 313-327.

Zhou, B., Conlee, R. K., Jensen, R., Fellingham, G. W., George, J. D., & Fisher, A. G. (2001). Stroke volume does not plateau during graded exercise in elite male distance runners. Medicine and Science in Sports and Exercise, 33(11), 1849-1854.

Annexe « A »:

Étude pilote

Idriss Sassi, Claude Lajoie, Hatem Ziadia, Louis Laurencelle, Alexandre Leduc, François Trudeau*

Département des Sciences de l'activité physique, Université du Québec à Trois-Rivières,

Trois-Rivières, QC.

Le 3 min$_{SM}$ en utilisant le Computrainer permet d'estimer la capacité anaérobie

Auteur pour correspondance :

François Trudeau, PhD, FACSM
Département des sciences de l'activité physique
Université du Québec à Trois-Rivières
3351, boul. des Forges, C.P. 500
Trois-Rivières (Québec) Canada G9A 5H7
Téléphone: (819) 376-5011 Extension 3767
Fax: (819) 376-5092
e-mail: francois.trudeau@uqtr.ca

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Résumé

Objectif : Vérifier la validité du test de 3 minutes supramaximal sur Computrainer (3min^{SM}) pour estimer la capacité anaérobie des cyclistes (W').

Méthodologie : 28 cyclistes de différents niveaux et des deux sexes (âge : 30,35 ± 8,61; taille : 173 ± 6,74; poids : 71,84 ± 8,50) ont fait un test de 3min^{SM} avec leur vélo personnel en utilisant le Computrainer dans les mêmes conditions. Le travail anaérobie réalisé au-dessus de la puissance finale est divisé en tranches de 15s. Puis on a appliqué l'équation de différence de zéro $x = ((\bar{X} - 0)/ET) \times \sqrt{(n)}$ afin de localiser le point d'épuisement total du W'.

Résultat : La W' est utilisée significativement depuis le début du test jusqu'à la 6ième tranche de 15s (entre 75 et 90s). Puis, l'utilisation de la W' reste très proche du 0 et non significative jusqu'à la fin du test à 180s.

Conclusion : Le test de 3min^{SM} en utilisant le Computrainer est valide afin d'estimer la capacité anaérobie des cyclistes, dont le point d'épuisement des réserves anaérobies se trouve entre les premières 75 et 90 s du test.

Mots clé : 3min^{SM}, Computrainer, Capacité anaérobie, Fidélité.

Introduction :

La réalisation du test de 3min^{SM} en utilisant un ergomètre électromagnétique « Lode », mécanique « Monark » ou isocinétique (SRM, Germany) est fidèle pour estimer la capacité anaérobie (W') et la puissance critique (PC) des participants d'une manière reproductible (Bergström et coll., 2012; Burnley et coll., 2006; Dekerle et coll., 2014; de Lucas et coll., 2014; Johnson et coll., 2011; Vanhatalo et coll., 2007). En effet, avec le 3min^{SM} la PC est calculée par la puissance moyenne des 30 dernières secondes du test, et le W est la quantité de travail accompli au-dessus de la puissance finale. La fidélité et la reproductibilité de l'utilisation du Computrainer lors de ce test n'ont pas encore été testées. En effet, le problème n'est pas au niveau de la reproductibilité du matériel utilisé, car plusieurs recherches depuis 1996 ont montré que le Computrainer donne des résultats reproductibles durant des tests de longue durée avec une charge de résistance constante et avec des variations de résistance brutale sur une longue période «30min » (Cane et coll., 1996; Earnest et coll., 2005; Guiraud et coll., 2010; Heil et coll., 2001; Peveler , 2013) .

Il y a des évidences indirectes qui montrent que la puissance finale du test de 3min^{SM} réalisé avec le Computrainer surestime la PC (McClave et coll., 2011). Donc, selon le concept de la puissance critique (PC = W'/t x P), la capacité anaérobie risque d'être sous-estimée. Mais, Gastin et Lawson (1994) ont montré que 90 s d'un test supramaximal permet d'estimer la capacité anaérobie, mesurée par le déficit maximal d'oxygène accumulé. D'autre part, Dekerle et coll. (2006) ont montré que malgré que la puissance finale d'un test de 90 s supramaximal surestime la PC, le travail accompli

Rapport-Gratuit.com

au-dessus de la PF est équivalent à la capacité anaérobie mesurée par la méthode conventionnelle (concept de la PC).

Pour cela, notre objectif est de vérifier la validité du test à estimer la capacité anaérobie (W'), même si la puissance finale surestime la puissance critique.

À la lumière de ces recherches notre hypothèse serait que le test de 3min^{SM} permet d'estimer la W' des participants indépendamment de la signification de la PF.

Méthodologie :

Participants: Les données de 28 sujets des deux sexes ont été utilisées au cours de cette étude (2 femmes et 26 hommes). Le niveau des athlètes varie entre moyennement entraîné à élite avec un minimum d'expérience de 2 ans en compétition (Tableau 1). Tous les tests se sont déroulés dans le même laboratoire avec le même protocole et les mêmes appareillages.

Tableau 1 : Nombre et caractéristiques anthropométriques des cyclistes

Nombre (n)	Elite (n)	Entraîné (n)	Moyen (n)	Âge (ans)	Taille (cm)	Poids (km)
28	6	15	7	30,35±8,61	173,72±6,74	71,48±8,50

Protocole : Le test supramaximal de 3min a été réalisé durant cette étude. Le test commence par 5 min d'échauffement à 100W suivis de 5 min de récupération passive, puis immédiatement après la récupération passive l'épreuve commence par un compte à rebours (3, 2, 1, GO) affiché avec un vidéo projecteur. Après la fin du test, le cycliste fait une récupération active à 50W pendant 10 min. Il est demandé au participant de développer le maximum de sa puissance tout au long de la durée du test. Pour cela

chaque cycliste a le droit de fixer son engrenage idéal avant le commencement du test afin de développer sa puissance pic au départ. Puis durant le déroulement du test, le cycliste peut changer son engrenage afin de développer le maximum de sa puissance tout au long des 3 minutes. Le cycliste reçoit un fort encouragement durant le test, mais sans avoir aucune information sur le temps écoulé (Francis et coll., 2010).

Le test est réalisé sur le même Computrainer (RacerMate, ComputrainerLab 8002, Seattle, WA, USA). Un puissance mètre est fixé au moyeu de la roue arrière pour calculer la puissance générée par le cycliste toutes les secondes en utilisant le Garmin Edge 500 (Francis et coll., 2010; Peveler, 2013). La capacité anaérobie est la quantité de travail réalisée au-dessus de la puissance finale mesurée durant les 30 dernières secondes.

Statistique : La mesure de la capacité anaérobie est faite avec des tranches de 15s, puis on a appliqué l'équation de différence de zéro « $x = ((\bar{X} - 0)/ET) \times \sqrt{(n)}$ » afin de vérifier dans quelle séquence de 15s le point d'épuisement de la capacité anaérobie se situe.

Le calcul est fait par à l'aide du logiciel « Excel 2010, Microsoft ». Finalement, on a utilisé le test de T-student bilatéral de Pearson avec un seuil de signification de 0,05.

Résultats

La capacité anaérobie moyenne des 28 participants est de 13847,7 ± 5740,0 J. L'utilisation de l'énergie anaérobie est significative dans les premières 90 s qui suivent le départ. Dans les premières 75s l'utilisation de la capacité anaérobie est significative à $p<0,001$. De même, entre 75 et 90 s la diminution est encore significative à $p<0,005$,

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

mais juste après les 90s l'utilisation de la capacité anaérobie n'est plus significative (Figure 1). La capacité anaérobie calculée à 90 est similaire que celle à 180s (13210,45 ± 4909,73 vs 13847,66 ± 5739,98 J; p> 0,05).

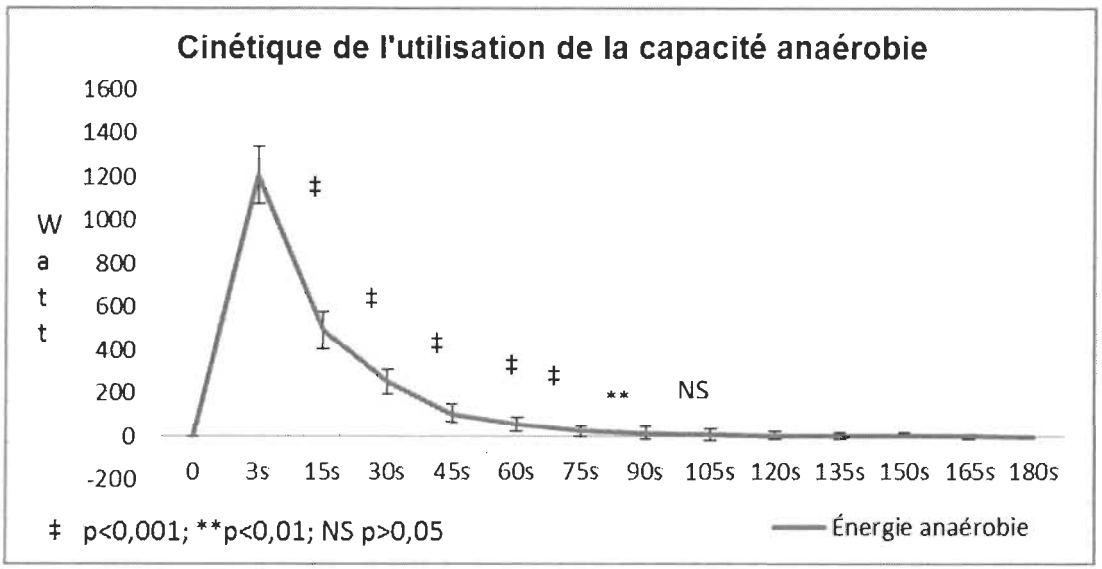


Figure 1 : L'analyse de la cinétique d'utilisation de la capacité anaérobie au cours du test de 3min^{SM}

Discussion

Notre objectif était de vérifier si le test de 3min^{SM} en utilisant le Computrainer permet d'estimer la capacité anaérobie (W') totale. Notre hypothèse a été confirmée, et les résultats montrent que le test de 3min^{SM} en utilisant le Computrainer permet d'épuiser les réserves anaérobies des athlètes dès les premières 90 s.

Le test de 3min^{SM} sur le Computrainer a permis d'estimer la W', comme c'était le cas si le test est réalisé sur un ergocycle électromagnétique « Lode » (Burnley et

coll., 2006; Johnson et coll., 2011; Vanhatalo et coll., 2007), ou Monark (Bergström et coll., 2012).

Le résultat de notre étude pilote est presque totalement similaire à celui de Barker et coll. (2012) qui ont montré que la capacité anaérobie calculée à 90s durant le test de 3min^{SM} réalisé sur un vélo électromagnétique « Lode » est égale à celle calculée à la fin du test (180s). Barker et coll. (2012) ont montré de plus que les W'90s et W'180s sont égaaux à la W' déterminée par la méthode conventionnelle (les tests de temps limite).

En effet, notre résultat et celui de Barker et coll. (2012) sont en accord avec ceux de Dekerle et coll. (2006) dont leur test se déroule sur 90s avec un ergocycle isocinétique (SRM), sachant que la PF du test était significativement plus importante que la PC. De plus, Gastin et Lawson (1994) ont montré avec la technique du déficit maximal d'oxygène accumulé, que 90 s durant un exercice supramaximal qui commence par un départ explosif est la durée nécessaire afin d'épuiser la totalité de l'énergie anaérobie et dans laquelle le métabolisme aérobie devient le fournisseur unique de l'énergie pour la puissance développée. Gastin et Lawson (1994) ont réalisé leurs tests sur un vélo Monark. La charge de résistance diminue tout au long du test où elle commence par 0,095 kg.kg^{-1} puis elle diminue à 0,075 kg.kg^{-1} à 30 s et diminue encore une dernière fois à 0,055 kg.kg^{-1} à 60s.

Donc, la capacité anaérobie peut être estimée au cours d'un test explosif et supramaximal sur sa longueur indépendamment du matériel, du protocole, et de la technique de mesure. Mais il faut que le test réponde à certains critères :

1- Réaliser un départ explosif.
2- Développer un effort maximal tout au long de la durée du test.
3- Faire un test entre 90 et 180s.
4- Assurer que le participant ne reçoit pas des informations sur le temps écoulé.
5- Appliquer au minimum une charge de résistance de 4,5% du poids du corps.
6- Réaliser le test sur un ergocycle reproductible
7- Il est recommandé d'avoir des cyclistes qui ont de l'expérience si le matériel utilisé est le Computrainer.
8- Assurer que la mesure de la puissance soit à la seconde ou moins s'il est possible.

Notre résultat nous permet de valider uniquement la mesure de la capacité anaérobie et non pas la puissance critique. Avec une puissance finale égale à 94 ± 8% de la PAM, on surestime probablement la PC, car depuis les premières études qui ont déterminé la PC et même l'estimer à travers le test de 3min^{SM}, la PC est toujours à 75 ± 3 % de la PAM (Bernley et coll., 2006; Gaesser et coll., 1996; Moritani et coll., 1981; Poole et coll., 1988, 1990; Vanhatalo et coll., 2007).

En admettant que notre PF surestime la PC, alors comment est-il possible de valider l'estimation du W' avec le test de 3min^{SM} alors que la PF surestime la PC? Car le concept de la PC-W' décrit une équation linéaire avec la puissance critique et la capacité anaérobie (PC = W'/t x P). Donc, on ne peut pas déterminer la capacité anaérobie sans atteindre la PC (W =W' + PC x t).

Mais, contrairement à la logique du concept de la PC, nos résultats et ceux de

Dekerle et coll. (2007) sur 90s ont montré qu'on peut estimer la capacité anaérobie, malgré que la PC soit surestimée. En effet, l'explication de ce phénomène se trouve dans les recherches de Ferguson et coll. (2010), et Jones et coll. (2003) qui ont montré avec des preuves indirectes que le concept de W' ne renferme pas uniquement les réserves énergétiques d'ATP, de PCr, de glycolyse anaérobie et de l'O_2 stocké au niveau des myoglobines. Mais, aussi d'un niveau d'accumulation des déchets métabolique comme, le phosphate inorganique (Pi), les ions H^+, et le potassium K^+. Par conséquent, l'atteinte de la PC ne peut être réalisée que si la W' est épuisée et qu'on atteint le seuil maximal d'accumulation des métabolites.

Les résultats des récentes recherches (Dekerle et coll., 2014; de Lucas et coll., 2014) ont appuyé cette hypothèse. En effet, la réalisation des tests de temps limite à différentes intensités et le test de 3min^{SM} deux fois à différentes cadences (60 et 100 rpm) ont montré que les deux différentes cadences donnent deux PC et deux W' significativement différents. La détermination de la PC ou leur estimation avec le 3min^{SM} à 60 rpm donnent des valeurs significativement plus élevées qu'avec les tests à 100 rpm. Mais au niveau de W' les valeurs sont significativement plus importantes à 100 rpm par rapport à 60 rpm (Dekerle et coll., 2014; de Lucas et coll., 2014).

Ces deux recherches nous montrent comment la vitesse de contraction, qui est l'un des facteurs qui contrôle l'accumulation des métabolites, influence les mesures de la PC et W' en adoptant la méthode conventionnelle et le 3min^{SM}.

Depuis l'article original de Moritani et coll., (1981) dans lequel il a validé le concept de la PC et la W' le tout le corps humain, les études qui ont cherché à déterminer la PC et la W' avec les tests de temps limite, ou à les estimer avec le

3min^{SM} n'ont pas exigé une cadence de leurs athlètes, mais ils l'ont laissé libre pour effectuer la tâche d'une manière naturelle (Bergström et coll., 2011; Bernley et coll., 2006; et coll., 2007; Gaesser et coll., 1996; Gastin et Dawson, 1994; Johnson et coll., 2011; Moritani et coll., 1981; Poole et coll., 1988, 1990; Vanhatalo et coll., 2007). En effet, la réalisation de notre 3min^{SM} avec le Computrainer garde la même notion en laissant l'athlète pédaler à sa propre cadence choisie. De plus, la valeur de la capacité anaérobie calculée dans notre étude est semblable de celle dans la littérature où la W' des athlètes d'endurance s'étale entre 10 et 15 kJ (Vanhatalo et Burnley, 2011).

Actuellement, la méthode naturelle est la plus valide, mais il est très intéressant de faire des recherches qui ont comme objectif de contrôler certaines variables durant le test de 3 min$_{SM}$ ou les tests de temps limite afin de mieux déterminer nos paramètres physiologiques.

D'autre part, nous croyons que le changement de la charge de résistance appliquée par le Computrainer durant le test de 3 min$_{SM}$ nous permettra d'estimer la PC et la W', à la fois.

Conclusion :

La réalisation du test de 3min^{SM} en utilisant le Computrainer est valide et reproductible pour estimer la capacité anaérobie et non pas la puissance critique.

Références

Barker, A. R., Bond, B., Toman, C., Williams, C. A., & Armstrong, N. (2012). Critical power in adolescents: physiological bases and assessment using all-out exercise. European Journal of Applied Physiology, 112(4), 1359-1370.

Bergström, H. C., Housh, T. J., Zuniga, J. M., Camic, C. L., Traylor, D. A., Schmidt, R. J., & Johnson, G. O. (2012). A new single work bout test to estimate critical power and anaerobic work capacity. The Journal of Strength & Conditioning Research, 26(3), 656-663.

Burnley, M., & Jones, A. M. (2007). Oxygen uptake kinetics as a determinant of sports performance. European Journal of Sport Science, 7(2), 63-79.

Cane, J., Seidman, B., Sowash, J., Otto, R., & Wygand, J. (1996). A Comparison of the Computrainer Load Simulator and Traditional Cycle Ergometry Medicine and Science in Sports and Exercise, 28(5), 208.

Dekerle, J., Brickley, G., Hammond, A. J. P., Pringle, J. S. M., & Carter, H. (2006). Validity of the two-parameter model in estimating the anaerobic work capacity. European Journal of Applied Physiology, 96(3), 257-264.

de Lucas, R. D., Greco, C. C., Dekerle, J., Carita, R. A., Guglielmo, L. G., & Denadai, B. S. (2014). Test-retest reliability of a 3-min isokinetic all-out test using two different cadences. Journal of Science and Medicine in Sport, 17(6), 645-649.

Dekerle, J., Barstow, T. J., Regan, L., & Carter, H. (2014). The critical power concept in all-out isokinetic exercise. Journal of Science and Medicine in Sport,, 17(6), 640-644.

Dekerle, J., Vanhatalo, A., & Burnley, M. (2008). Determination of critical power from a single test. Science & Sports, 23(5), 231-238.

Earnest, C. P., Wharton, R. P., Church, T. S., & Lucia, A. (2005). Reliability of the Lode Excalibur Sport Ergometer and applicability to Computrainer electromagnetically braked cycling training device. The Journal of Strength & Conditioning Research, 19(2), 344-348.

Ferguson, C., Rossiter, H. B., Whipp, B. J., Cathcart, A. J., Murgatroyd, S. R., & Ward, S. A. (2010). Effect of recovery duration from prior exhaustive exercise on the parameters of the power-duration relationship. Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985), 108(4), 866-874.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Francis, J. T., Jr., Quinn, T. J., Amann, M., & LaRoche, D. P. (2010). Defining intensity domains from the end power of a 3-min all-out cycling test. Medicine and Science in Sports and Exercise, 42(9), 1769-1775.

Gaesser, G. A., & Poole, D. C. (1996). The slow component of oxygen uptake kinetics in humans. Exercise & Sport Sciences Reviews, 24, 35-70.

Gastin, P. B., & Lawson, D. L. (1994). Variable resistance all-out test to generate accumulated oxygen deficit and predict anaerobic capacity. European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology, 69(4), 331-336.

Guiraud, T., Leger, L., Long, A., Thebault, N., Tremblay, J., & Passelergue, P. (2010). Vo2 requirement at different displayed power outputs on five cycle ergometer models: a preliminary study. British Journal of Sports Medicine, 44(6), 449-454.

Heil, D. P., Murphy, O. F., Mattingly, A. R., & Higginson, B. K. (2001). Prediction of uphill time-trial bicycling performance in humans with a scaling-derived protocol. European Journal of Applied Physiology, 85(3-4), 374-382.

Johnson, T. M., Sexton, P. J., Placek, A. M., Murray, S. R., & Pettitt, R. W. (2011). Reliability analysis of the 3-min all-out exercise test for cycle ergometry. Medicine and Science in Sports and Exercise, 43(12), 2375-2380.

Jones, A. M., Wilkerson, D. P., Burnley, M., & Koppo, K. (2003). Prior heavy exercise enhances performance during subsequent perimaximal exercise. Medicine and Science in Sports and Exercise, 35(12), 2085-2092.

McClave, S. A., LeBlanc, M., & Hawkins, S. A. (2011). Sustainability of critical power determined by a 3-minute all-out test in elite cyclists. The Journal of Strength & Conditioning Research, 25(11), 3093-3098.

Moritani, T., Nagata, A., Devries, H. A., & Muro, M. (1981). Critical power as a measure of physical work capacity and anaerobic threshold. Ergonomics, 24(5), 339-350.

Peveler, W. W. (2013). The accuracy of simulated indoor time trials utilizing a CompuTrainer and GPS data. Journal of Strength and Conditioning Research, 27(10), 2823-2827.

Poole, D. C., Ward, S. A., Gardner, G.-W., & Whipp, B. J. (1988). Metabolic and respiratory profile of the upper limit for prolonged exercise in man. Ergonomics, 31(9), 1265-1279.

Poole, D. C., Ward, S. A., & Whipp, B. J. (1990). The effects of training on the metabolic and respiratory profile of high-intensity cycle ergometer exercise.

European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology, 59(6), 421-429.

Vanhatalo, A., Jones, A. M., & Burnley, M. (2011). Application of critical power in sport. International Journal of Sports Physiology and Performance, 6(1), 128-136.

Vanhatalo, A., Doust, J. H., & Burnley, M. (2007). Determination of critical power using a 3-min all-out cycling test. Medicine and Science in Sports and Exercise, 39(3), 548-555.

Rapport-Gratuit.com