

Revue générale

# Extension du modèle puissance–temps limite pour estimer la production d'énergie aérobie et anaérobie lors de l'exercice intense<sup>☆</sup>

## An extended model of power–exhaustion time to estimate aerobic and anaerobic energy production during intense exercise

T. Busso<sup>\*</sup>, M. Chatagnon

*Laboratoire de physiologie et physiopathologie de l'exercice et handicap, service de médecine du sport et myologie, université de Saint-Étienne, hôpital Bellevue, CHU de Saint-Étienne, 42055 Saint-Étienne cedex 2, France*

Reçu le 22 juin 2007 ; accepté le 23 juin 2007

Disponible sur Internet le 2 juin 2008

### Résumé

**Objectif.** – Examiner comment la modélisation de la relation entre puissance et temps limite permettrait une estimation de la production d'énergie aérobie et anaérobie lors d'un exercice intense.

**Actualités.** – Le modèle hyperbolique a permis de définir la puissance critique correspondant au taux maximal d'énergie renouvelée par le métabolisme aérobie. Un nouveau modèle différenciant la puissance critique de la puissance maximale aérobie a été construit afin d'estimer plus précisément la contribution anaérobie. Les données provenant de coureurs de demi-fond et de sujets testés sur ergocycle ont montré une contribution anaérobie apparaissant à la puissance critique et augmentant jusqu'à environ 10 % de la puissance totale quand la production d'énergie aérobie est à son maximum.

**Perspectives.** – La prise en compte de la composante lente de la consommation d'oxygène permettrait une analyse plus précise de la production et de la transformation d'énergie lors d'un exercice à intensité élevée.

© 2008 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

### Abstract

**Aim.** – Examine how the modelling of the relation between power and time to exhaustion can provide an estimation of the production of aerobic and anaerobic energy during intense exercise.

**Current knowledge.** – The hyperbolic model made it possible to define the critical power corresponding to the maximal rate of energy renewed by aerobic metabolism. A new model distinguishing the critical power from the maximal aerobic power has been built to estimate more precisely the anaerobic contribution. Data from middle distance runners and subjects tested on cycle ergometer showed a relative contribution of anaerobic metabolism arising from critical power and increasing until around 10 % of total power when aerobic energy production reaches its maximum.

**Prospects.** – Considering the slow component of oxygen uptake would provide a more precise analysis of energy production and transformation during exercise at high intensity.

© 2008 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

**Mots clés :** Modélisation ; Énergétique ; Endurance ; Capacité anaérobie

**Keywords:** Modelling; Energetic; Endurance; Anaerobic capacity

## 1. Introduction

Il est difficile de quantifier précisément la production d'énergie par le métabolisme anaérobie lors d'un exercice physique. Contrairement au métabolisme aérobie qui peut être évalué par la mesure de la consommation d'oxygène,

<sup>☆</sup> Présentée au colloque « Puissance critique » Lille, 22 et 23 juin 2007.

<sup>\*</sup> Auteur correspondant.

Adresse e-mail : [busso@univ-st-etienne.fr](mailto:busso@univ-st-etienne.fr) (T. Busso).

le métabolisme anaérobie nécessite d'être mesuré par des techniques invasives permettant de connaître l'évolution des métabolites musculaires et les flux d'échanges entre les muscles actifs et le sang [1]. Une évaluation indirecte de l'énergie produite par les processus anaérobies peut être réalisée à partir de la relation entre le temps d'endurance et la puissance développée lors de l'exercice. Cette revue brève de la littérature a pour but d'examiner l'intérêt de ce type de modélisation dans l'étude de la contribution des filières aérobie et anaérobie dans la production d'énergie lors d'un exercice intense.

## 2. Modèle hyperbolique simple

Le modèle hyperbolique simple qui décrit la relation entre la durée maximale d'un exercice et son intensité a été initialement identifié lors de l'exercice local [15]. L'étude de Moritani et al. a été la première à vérifier que le modèle hyperbolique pouvait être appliqué aux épreuves de temps limite lors d'exercices impliquant la majorité de la masse musculaire et sollicitant fortement le système cardiorespiratoire [12].

Le modèle hyperbolique simple a été développé à partir de la relation linéaire observée entre la durée maximale de l'épreuve et le travail total réalisé, appelés respectivement temps limite ( $T_{\text{lim}}$ ) et travail limite ( $W_{\text{lim}}$ ). Soit

$$W_{\text{lim}} = W' + P_c \cdot T_{\text{lim}}$$

L'ordonnée à l'origine ( $W'$ ) a la dimension d'un travail et la pente ( $P_c$ ) celle d'une puissance. En d'autres termes, le travail limite serait déterminé par un taux maximum de reconstitution d'énergie ( $P_c$ ) et une réserve finie d'énergie ( $W'$ ). Comme  $P_c$  est l'asymptote de la relation quand le temps tend vers l'infini, cette puissance représenterait la puissance maximale qui peut être maintenue sans fatigue. C'est cette observation qui a donné naissance au concept de la puissance critique, la durée maximale d'un exercice à une puissance supérieure à  $P_c$  étant dépendante de la vitesse d'utilisation de la réserve  $W'$  [11,14].

La littérature fournit beaucoup de données concernant la comparaison entre  $P_c$  et différents indicateurs de l'endurance aérobie montrant une bonne corrélation avec les différentes méthodes de détection du seuil ventilatoire et du seuil lactique [13].  $P_c$  peut être considéré comme étant la puissance la plus élevée pouvant être produite en maintenant une concentration de lactate et un pH stables dans le sang [18] et serait la frontière entre intensité difficile et sévère. Le domaine d'intensité sévère a été caractérisé par l'augmentation progressive de lactate dans le sang et de la consommation d'oxygène jusqu'à l'épuisement du sujet [9,17]. Il est généralement reconnu que l'accumulation de lactate résulte de la différence entre la production et l'élimination dans les différents territoires de l'organisme [3]. En considérant que l'élimination du lactate est inclus dans les processus oxydatifs,  $P_c$  pourrait correspondre à la puissance la plus élevée pouvant être produite sans contribution nette du métabolisme anaérobie à l'échelle de l'organisme entier.

L'étude de Scherrer et al. sur l'exercice local mentionnait des données montrant que la capacité de travail sous garrot artériel était indépendante de la puissance développée [15].  $P_c$  n'interviendrait qu'en présence d'un drainage vasculaire

normal [15].  $W'$  estimé à partir d'épreuves sur ergocycle n'était pas affecté en condition hypoxique [12].  $W'$  correspondrait donc la quantité maximale d'énergie pouvant être libérée par le métabolisme anaérobie et  $P_c$  au taux de production d'énergie par le métabolisme aérobie. En d'autres termes, les paramètres de la relation entre puissance et temps limite représenteraient respectivement la puissance maximale aérobie et la capacité anaérobie [7]. À notre connaissance, aucune étude n'a montré que  $P_c$  correspondrait effectivement à la puissance maximale aérobie, alors que la plupart ont donné des valeurs de  $P_c$  inférieures à cette puissance, même en utilisant uniquement des épreuves d'endurance de courte durée [16].

Les contradictions concernant la signification physiologique de  $P_c$  peuvent être dues à la simplicité du modèle, qui a l'avantage d'ajuster précisément la relation entre puissance et temps limite, mais dont les deux paramètres ne suffiraient pas pour évaluer l'origine aérobie et anaérobie de la production d'énergie lors des épreuves de temps limite.

## 3. Cinétique du métabolisme aérobie

Le modèle hyperbolique simple ne tient pas compte de l'énergie d'origine anaérobie correspondant au déficit en oxygène ( $O_2$ ) au début de l'exercice. L'hypothèse d'une dynamique du métabolisme aérobie infiniment rapide peut être en partie levée par la correction proposée en 1980 par Wilkie [19]. Le déficit initial en  $O_2$  peut être calculé en considérant que la consommation d'oxygène augmente de manière mono-exponentielle jusqu'à l'atteinte d'un état stable. Par intégration de la fonction mono-exponentielle, l'équivalent du déficit initial en  $O_2$  exprimé en travail externe peut être calculé à partir de la puissance développée lors de l'exercice

$$\text{Déficit} = P \cdot (1 - e^{-T/\tau}) \cdot \tau$$

où  $T$  représente le temps et  $\tau$  une constante de temps.

Le modèle de la puissance critique devient avec cette correction

$$W_{\text{lim}} = W' - P_c \cdot (1 - e^{-T_{\text{lim}}/\tau})\tau + P_c \cdot T_{\text{lim}}$$

Pour des temps limites supérieurs à plusieurs minutes, le terme  $e^{-T_{\text{lim}}/\tau}$  est négligeable devant 1. Ainsi, le déficit initial peut être plus simplement calculé à partir du produit de la puissance et de la constante de temps. Le modèle hyperbolique peut donc s'écrire

$$W_{\text{lim}} = W' - P_c \cdot \tau + P_c \cdot T_{\text{lim}}$$

Cette correction simple qui tient compte du déficit en  $O_2$  en début d'exercice permet une meilleure estimation du travail produit par la transformation de l'énergie d'origine aérobie ou anaérobie.

#### 4. Nouvelle extension du modèle hyperbolique

##### 4.1. Distinction entre $P_c$ et puissance maximale aérobie

Nous avons proposé une nouvelle formulation du modèle hyperbolique qui distingue  $P_c$  de la puissance maximale aérobie [5].  $P_c$  correspond dans ce modèle à la puissance maximale qui peut être produite exclusivement par le métabolisme aérobie. La puissance produite par le métabolisme aérobie peut être supérieure à  $P_c$ , mais est dans ce cas associé à une production d'énergie anaérobie. Comme pour le modèle hyperbolique simple,  $P_c$  est l'asymptote de la relation pour un temps d'exercice tendant vers l'infini. La principale nouveauté de cette extension du modèle hyperbolique réside dans l'introduction d'une seconde puissance critique, notée  $P_t$ , qui correspond à la puissance totale quand le métabolisme aérobie est à son maximum de puissance. La différence entre  $P_t$  et la puissance maximale aérobie correspond à la contribution du métabolisme anaérobie. Comme pour le modèle hyperbolique simple, l'arrêt d'un exercice à une puissance supérieure à  $P_c$  est du à l'utilisation complète de la réserve d'énergie  $W'$ , qui correspond ainsi à l'énergie totale pouvant être produite par les processus anaérobies.

##### 4.2. Formulation du modèle

Ce nouveau modèle a été construit sur un ensemble d'hypothèses concernant la contribution aérobie et anaérobie en fonction de la puissance produite totale. La cinétique de la filière aérobie est intégrée dans ce nouveau modèle en utilisant la correction de Wilkie [19]. Après une augmentation exponentielle avec une constante de temps  $\tau$ , la puissance libérée par le métabolisme aérobie se stabilise à un niveau dépendant de l'intensité de l'exercice. Concernant le métabolisme anaérobie, la correction de Wilkie permet d'intégrer le déficit initial en  $O_2$  au début d'exercice.

Pour une puissance  $P$  comprise entre  $P_c$  et  $P_t$ , le modèle considère que la filière anaérobie participe continuellement à l'apport d'énergie même pour des conditions stables de la consommation d'oxygène (Fig. 1). Cette fraction d'énergie anaérobie ( $\alpha$ ) est proportionnelle à la différence entre  $P$  et  $P_c$  et s'ajoute au déficit initial en  $O_2$ . Le travail total d'origine anaérobie inclue le déficit initial, calculé par le produit entre la constante de temps et la puissance aérobie atteinte à l'état stable ( $P_{es}$ ). Le second terme correspond à la contribution anaérobie à l'état stable.  $T_{lim}$  est déterminé par l'utilisation complète de la réserve  $W'$ , soit

$$W' = P_{es} \cdot \tau + (P - P_{es}) \cdot T_{lim}$$

$$\text{avec } P_{es} = P_c + (1 - \alpha) \cdot (P - P_c)$$

Dans le cas d'un exercice à une puissance  $P$  supérieure à  $P_t$  (Fig. 1), le travail total d'origine anaérobie inclue le déficit initial calculé par le produit entre la constante de temps et la puissance maximale aérobie atteinte à l'état stable ( $P_{esmax}$ ). La contribution anaérobie à l'état stable est égale à la différence

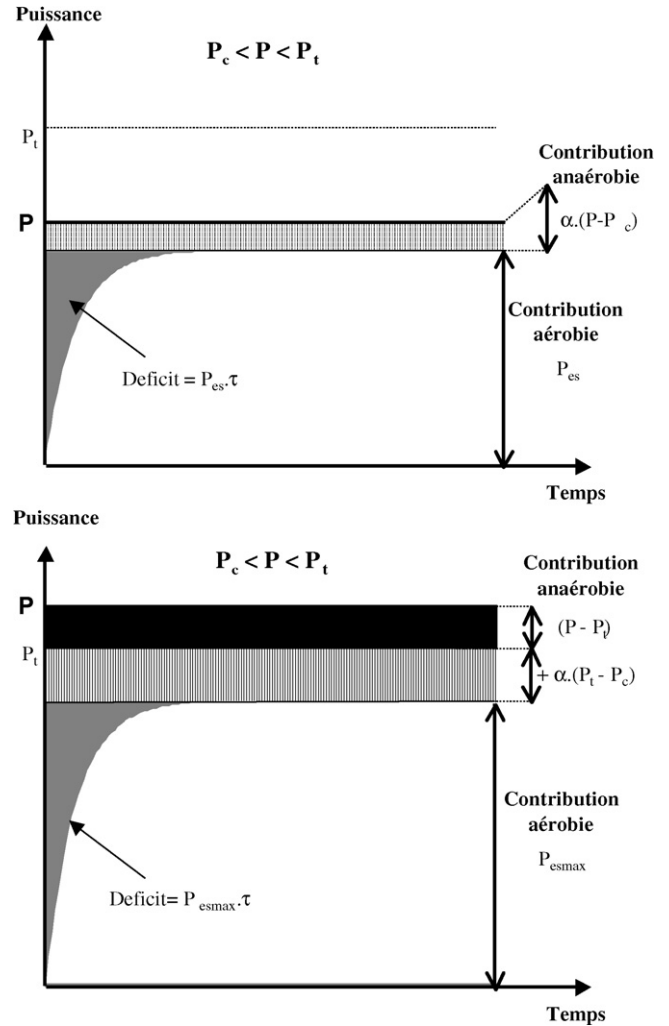


Fig. 1. Représentation schématique de l'extension du modèle de la relation entre puissance et temps limite.

entre la puissance totale et  $P_{esmax}$  :

$$W' = P_{esmax} \cdot \tau + (P - P_{esmax}) \cdot T_{lim}$$

$$\text{avec } P_{esmax} = P_c + (1 - \alpha) \cdot (P_t - P_c)$$

##### 4.3. Résolution du modèle

Le modèle a été testé en utilisant la puissance métabolique libérée lors de la course à pied [5] et en utilisant la puissance externe développée sur ergocycle [6]. Pour la performance en course à pied, l'analyse a porté sur les données des records du monde et les meilleures performances françaises sur des distances allant de 1500 à 5000 m publiés dans une étude antérieure [10]. La puissance métabolique a été calculée à partir de la vitesse de course en considérant que le rendement était constant selon la procédure décrite par di Prampero et al. [8].

Le modèle est basé sur deux équations distinctes selon que la puissance totale est inférieure ou supérieure à  $P_t$ . La détermination des paramètres de ce modèle ( $P_c$ ,  $\alpha$  et  $W'$ ) nécessite de fixer les puissances pour les épreuves de temps limite afin d'avoir au

moins une épreuve à une puissance inférieure à  $P_t$  et au moins une épreuve à une puissance supérieure à  $P_t$ . Les valeurs de  $P_t$  et de  $\tau$  doivent être déterminées indépendamment des autres paramètres, car ils ne peuvent être obtenus par la procédure de minimisation des écarts quadratiques entre les temps limites mesurés et ceux donnés par le modèle. La valeur de  $P_t$  a été fixée en choisissant la puissance moyenne sur 3000 m [5] ou la puissance à l'atteinte de la consommation maximale d'oxygène lors d'une épreuve progressive [6].

Les indicateurs de la qualité de l'ajustement ont montré que l'introduction du paramètre  $\alpha$  dans le modèle permettait une amélioration significative de l'ajustement de la relation entre puissance et temps limite [6]. Comme on pouvait le suspecter, seule l'estimation de  $W'$  a été significativement affectée par le choix de la valeur de  $\tau$ . Choisir une valeur nulle revient à négliger le déficit initial en oxygène, mais cela a l'avantage de simplifier les équations du modèle. Connaissant la sous-estimation de  $W'$  que cela entraîne, le modèle simplifié avec  $\tau = 0$  s peut s'avérer utile pour l'estimation des autres paramètres du modèle. D'un point de vue physiologique, choisir une constante de temps plus proche de la réalité reste la méthode la plus appropriée, surtout si on veut une estimation non biaisée de  $W'$ .

## 5. Contribution anaérobie à la production totale d'énergie

Les deux études mentionnées ci-dessus ont concerné des populations de niveau d'entraînement très différent et en plus de l'analyse des records du monde, le modèle a été appliqué aux meilleurs coureurs de demi-fond français [5] et à un groupe de sujets actifs ayant une pratique sportive de loisir [6]. Malgré les différences dans les méthodes utilisées, les données de ces deux études permettent de faire une comparaison de la contribution anaérobie lors d'exercices sous maximaux en fonction du niveau d'aptitude aérobie des sujets. La consommation maximale d'oxygène était de  $73,2 \pm 4,2$  ml  $O_2$  par minute par kilogramme pour les coureurs de demi-fond [5] et de  $49,4 \pm 3,6$  ml  $O_2$  par minute par kilogramme pour les sujets sur ergocycle [6].

La fraction de l'énergie produite par le métabolisme anaérobie à l'état stable ( $F_{anaer}$ ) peut être calculée en fonction de la puissance totale à partir des paramètres du modèle. Pour un exercice à une puissance comprise entre  $P_c$  et  $P_t$ ,  $F_{anaer}$  est obtenu par

$$F_{anaer}(\%) = \alpha(P - P_c) / P \cdot 100$$

Ce paramètre permet d'évaluer la part de l'énergie anaérobie dans l'énergie totale dans le cas d'exercice à des puissances inférieures à la puissance maximale aérobie. Les études sur la course à pied et l'exercice sur ergocycle ont montré toutes deux que la valeur choisie pour  $\tau$  n'avait pas d'influence significative sur l'estimation de  $F_{anaer}$ .  $F_{anaer}$  était supérieure à zéro pour une puissance supérieure à  $P_c$  dont la valeur n'était pas statistiquement différente de la puissance au seuil 4 mM pour les coureurs à pied [5] ou légèrement inférieure à la puissance au seuil ventilatoire pour les sujets sur ergocycle [6].  $F_{anaer}$  augmentait avec l'intensité de l'exercice pour atteindre  $P_t$ , une valeur d'environ 8 % chez les coureurs à pied et 12 % chez les sujets sur ergocycle (Fig. 2). Cette différence de contribution

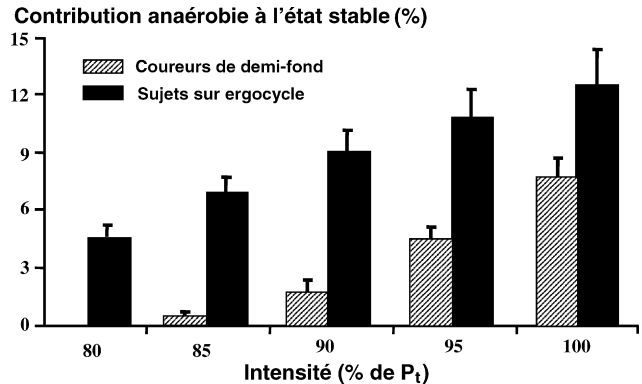


Fig. 2. Part relative de la puissance totale produite par le métabolisme anaérobie à l'état stable.

à  $P_t$  n'atteignait pas les limites de signification statistique ( $P = 0,052$ ). Les différences de contribution anaérobie entre les athlètes et les non-athlètes apparaissent plus clairement si les valeurs de  $F_{anaer}$  sont comparées à des intensités d'exercice exprimées en pourcentage de  $P_t$  (Fig. 2). Ces différences lors d'exercices sous-maximaux résultent du fait que  $P_c$  était égal à  $87 \pm 5$  % de  $P_t$  pour les coureurs de demi-fond et à  $67 \pm 11$  % de  $P_t$  pour les sujets sur ergocycle (différence significative avec  $P < 0,001$ ). Comme cela a déjà été montré pour le seuil lactique, l'intensité relative correspondant à  $P_c$  serait un facteur essentiel de l'endurance aux intensités élevées.

Les valeurs de  $F_{anaer}$  obtenues avec le modèle sont supérieures aux résultats obtenus chez le rat lors d'exercice où la concentration de lactate dans le sang était supérieure au taux de repos [4]. L'utilisation de lactate marqué montrait une contribution négligeable du métabolisme anaérobie (de l'ordre de 1 %). Mais, dans cette étude, les exercices aux alentours de 65 % de  $VO_{2max}$  s'échelonnaient de 25 à 70 minutes indiquant une intensité d'exercice inférieure au registre étudié avec le modèle puissance–temps limite. Les valeurs de  $F_{anaer}$  obtenues sont plus en accord avec les travaux de Bangsbo et al. portant sur l'exercice local [2]. Les métabolites sanguins et musculaires d'une jambe effectuant un travail d'extension ont permis d'estimer à environ 10 % l'énergie provenant du métabolisme anaérobie à des intensités d'exercice élevées. Il faut être cependant prudent en comparant la production d'énergie anaérobie dans un muscle actif avec  $F_{anaer}$  qui correspondrait plutôt à une contribution nette à l'échelle de l'organisme entier.

## 6. Conclusion

Les résultats obtenus avec la nouvelle extension du modèle hyperbolique montre une contribution anaérobie substantielle même si l'intensité d'exercice ne sollicite pas la puissance maximale aérobie. Une intensité comprise entre 70 et 100 % de la puissance maximale aérobie, ou entre 85–90 et 100 % selon le niveau d'entraînement, correspondrait à une zone de transition entre des intensités plus modérées pouvant être maintenue avec une concentration de lactate à l'état stable et des intensités plus sévères correspondant à une demande supérieure

à la consommation maximale d'oxygène du sujet. Les limites majeures de l'analyse faite avec la nouvelle extension du modèle hyperbolique reposent sur les simplifications faites en considérant l'atteinte d'un état stable pour les productions d'énergie aérobie et anaérobie. Dans cette zone d'intensité, la composante lente de la consommation d'oxygène montre que la cinétique est plus complexe que le modèle mono-exponentiel utilisé. Cette composante lente pourrait résulter d'un rendement énergétique variant avec l'intensité et la durée de l'exercice.

## Références

- [1] Bangsbo J. Quantification of anaerobic energy production during intense exercise. *Med Sci Sports Exerc* 1998;30:47–52.
- [2] Bangsbo J, Gollnick PD, Graham TE, Juel C, Kiens B, Mizuno M, et al. Anaerobic energy production and O<sub>2</sub> deficit-debt relationship during exhaustive exercise in humans. *J Physiol* 1990;422:539–59.
- [3] Brooks GA. Anaerobic threshold: review of the concept and directions for future research. *Med Sci Sports Exerc* 1985;17:22–34.
- [4] Brooks GA, Donovan CM, White TP. Estimation of anaerobic energy production and efficiency in rats during exercise. *J Appl Physiol* 1984;56:520–5.
- [5] Busso T, Chatagnon M. Modelling of aerobic and anaerobic energy production in middle-distance running. *Eur J Appl Physiol* 2006;97:745–54.
- [6] Chatagnon M, Busso T. Modelling of aerobic and anaerobic energy production during exhaustive exercise on a cycle ergometer. *Eur J Appl Physiol* 2006;97:755–60.
- [7] di Prampero PE. The concept of critical velocity: a brief analysis. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1999;80:162–4.
- [8] di Prampero PE, Capelli C, Pagliaro P, Antonutto G, Girardis M, Zamparo P, et al. Energetics of best performances in middle-distance running. *J Appl Physiol* 1993;74:2318–24.
- [9] Gaesser GA, Poole DC. The slow component of oxygen uptake kinetics in humans. *Exerc Sport Sci Rev* 1996;24:35–71.
- [10] Lacour JR, Padilla-Magunacelaya S, Barthelemy JC, Dormois D. The energetics of middle-distance running. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1990;60:38–43.
- [11] Monod H, Scherrer J. The work capacity of a synergic muscular group. *Ergonomics* 1965;8:329–38.
- [12] Moritani T, Nagata A, deVries HA, Muro M. Critical power as a measure of physical work capacity and anaerobic threshold. *Ergonomics* 1981;24:339–50.
- [13] Morton RH, Hodgson DJ. The relationship between power output and endurance: a brief review. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1996;73:491–502.
- [14] Scherrer J, Monod H. Le travail musculaire local et la fatigue chez l'Homme. *J Physiol (Paris)* 1960;52:419–501.
- [15] Scherrer J, Samson M, Paleologue A. Étude du travail musculaire et de la fatigue. Données ergométriques chez l'Homme. *J Physiol (Paris)* 1954;46:887–916.
- [16] Vandewalle H, Vautier JF, Kachouri M, Lechevalier JM, Monod H. Work-exhaustion time relationships and the critical power concept. A critical review. *J Sports Med Phys Fitness* 1997;37:89–102.
- [17] Whipp BJ. Dynamics of pulmonary gas exchange. *Circulation* 1987;76:VI18–28.
- [18] Whipp BJ, Ward SA. Respiratory responses of athletes to exercise. In: Harries M, Williams C, Stanish WD, Micheli LJ, editors. *Oxford textbook of sports medicine*. Oxford: Oxford University Press; 1994. p. 13–27.
- [19] Wilkie DR. Equations describing power input by humans as a function of duration of exercise. In: Cerretelli P, Whipp BJ, editors. *Exercise bioenergetics and gas exchange*. Amsterdam: Elsevier; 1980. p. 75–80.