



Université de Franche-Comté

U.P.F.R. Sports Besançon

Mémoire pour l'obtention du
Diplôme de MASTER 2 Spécialité : EMIS

**Détermination de la puissance critique et de la réserve anaérobie auprès
d'une équipe féminine UCI World Tour**

Maxime CZAJKOWSKI

Directeur Projet : Frédéric GRAPPE

Responsable de stage : Nicolas MARCHE

Année 2016-2017

Table des abréviations

Abréviations	Signification	Unité de mesure
PMA	Puissance Maximale Aérobie	Watts (W)
VMA	Vitesse Maximale Aérobie	km.h ⁻¹
VO ₂	Consommation d'oxygène	ml/min/kg
VO _{2max}	Consommation maximale d'oxygène	ml/min/kg
P _{méca}	Puissance mécanique	Watts (W)
P _{max}	Puissance maximale	Watts (W)
P _{moy}	Puissance moyenne	Watts (W)
T _{lim}	Temps limite	Secondes (s)
F	Force	Newton (N)
vVO _{2max}	Vitesse associée à la consommation maximale d'oxygène	km.h ⁻¹ ou m.s ⁻¹
pVO _{2max}	Puissance associée à la consommation maximale d'oxygène	Watts (W)
W _{lim}	Travail limite	Kilojoules (Kj)

Table des matières

I.	Introduction.....	2
II.	Revue de littérature.....	4
	1) Le concept de puissance critique (P_{crit})	4
	2) Les fondements physiologiques de la P_{crit} et de W'	8
III.	Méthodologie.....	13
	1) Sujets.....	13
	2) Matériels.....	14
	3) Protocole des tests de laboratoire.....	15
	4) Détermination du profil des coureurs.....	16
	5) Détermination de CP et W'	16
	6) Analyse statistique.....	17
IV.	Résultats.....	17
	1) Tests de laboratoire.....	17
	2) Calcul de la P_{crit} et de W'	17
	3) Test de corrélation	19
V.	Discussion.....	23
VI.	Conclusion.....	26
	Bibliographie.....	27

I. Introduction générale

La physiologie humaine ne permet pas à l'homme de pouvoir maintenir une vitesse maximale durant une période indéterminée. En effet, les différentes filières énergétiques restituent l'énergie métabolique en travail mécanique (W). Les métabolismes anaérobies (alactique et lactique) disposent d'une grande quantité d'ATP (Adénosine Tri Phosphate) mais sur une période de temps limitée, alors que les métabolismes aérobie (cycle de Krebs et chaînes respiratoires) disposent d'une quantité « infinie » d'ATP mais d'un faible débit. Ces processus expliquent ainsi pourquoi la relation entre la vitesse maximale et la durée de l'effort n'est pas linéaire.

Au cours du siècle dernier, de nombreux chercheurs se sont intéressés à cette relation entre la durée et l'intensité de l'effort. Kennelly (1906) puis Hill (1927), ont ainsi démontré la forme hyperbolique de cette relation. Ensuite, Scherrer et coll. (1954), Scherrer (1958) et Monod et Scherrer (1960, 1965) ont montré qu'il existait une relation linéaire entre le temps limite (T_{lim}) et la quantité de travail effectué (W_{lim}) du type :

$$W_{lim} = a + bt_{lim}$$

Où « b », correspond à la pente de la droite et à la puissance P_{crit} . Elle a été définie comme l'intensité d'exercice la plus élevée stimulant le métabolisme aérobie (Monod et Scherrer, 1965 ; Moritani et coll., 1981 ; Hill, 1993). En effet, le concept permettrait de différencier les exercices d'intensités « lourds » et « sévères ». Un exercice effectué en dessous de la P_{crit} , permettrait d'atteindre des niveaux stables de VO_2 , lactate sanguin (La) et de phosphocréatine (Pcr) (Poole et coll. 1988 ; Jones et coll. 2008 ; Vanhatalo et coll. 2010). En revanche, un exercice effectué au-dessus de la P_{crit} engendrerait, plus ou moins rapidement, une dérive de la VO_2 au cours du temps et un arrêt de l'exercice (Jones et coll. 2011).

Quant au paramètre « a », il correspond à l'ordonnée à l'origine et se définit comme une composante dans la production d'énergie par la voie anaérobie appelée W' pouvant être utilisée à tout moment d'un exercice et aboutissant à l'épuisement lorsqu'elle est totalement consommée. Tout exercice effectué au-dessus de la P_{crit} conduit à une diminution des réserves anaérobies et donc de W' . En revanche tout exercice réalisé en dessous de la P_{crit} n'engendre pas une déplétion de cette réserve anaérobie. Ainsi l'exercice peut être maintenu pendant une période prolongée.

La notion de P_{crit} peut donc être utile à la pratique du cyclisme que ce soit à l'entraînement ou en compétition. En effet, à partir de l'équation de Monod et Scherer, il est possible de déterminer le T_{lim} d'un exercice effectué au-dessus de la P_{crit} . Grâce à ce modèle mathématique, il est aussi possible de prévoir la $P_{méca}$ à produire pour que le sujet atteigne l'épuisement local à un instant t . Enfin, d'après Le Chevalier et coll. (2000), elle semble être un indice d'endurance locale car elle est très proche de la limite supérieure des états stables concernant la VO_2 et la lactatémie.

L'objectif de l'étude était de déterminer la P_{crit} et W' auprès de 7 cyclistes de l'équipe FDJ Nouvelle-Aquitaine Futuroscope ayant des profils différents (grimpeuses, rouleuses, sprinteuses et mixtes).

A ce jour, aucune étude n'a été conduite afin de déterminer la P_{crit} et la réserve anaérobie (W') auprès d'un groupe d'athlètes de haut niveau.

Pinot et Grappe (2011) ont comparé l'indice d'endurance (IE) auprès de coureurs professionnels ayant des profils différents (grimpeur, rouleur, sprinteur et mixte). Cet indice mis en place par Perronet et Thibaut (1984) donne une information sur le potentiel endurant de l'athlète à partir de la pente de la droite de régression entre la fraction d'utilisation de VO_{2max} et le logarithme du temps entre 7 min et 2 h. Les résultats montrent que malgré un profil de performance totalement différent, l'IE entre ces 4 types de profils reste très proche. L'analyse ANOVA montre qu'il n'existait pas de différences significatives ($p < 0,05$) entre ces 4 coureurs.

Vantaholo et coll. (2011) ont montré que la réserve anaérobie W' est étroitement liée à la courbure de la courbe $P_{méca}$ – temps. Les cyclistes endurants type « grimpeurs » qui possèdent une P_{crit} élevée relative à leurs VO_{2max} tendent à avoir des valeurs de W' assez basses (> 15 Kj). Les sprinteurs quant à eux tendent à avoir une VO_{2max} moindre et donc une P_{crit} plus faible mais des valeurs de W' beaucoup plus hautes (> 25 Kj). Enfin, Moritani et coll. (1981) ont montré que la P_{crit} était proche du seuil anaérobie ($r = 0,91$).

Les hypothèses attendues sont :

- Les valeurs de P_{crit} devraient être supérieures chez les cyclistes possédant une forte VO_{2max}

- La réserve anaérobie W' devrait être plus importante chez les cyclistes possédant une P_{crit} moindre.
- Les $P_{méca}$ atteintes au seuil anaérobie (SV2) devraient être proches de la P_{crit} .
- Malgré des profils de performance opposés, les différences de P_{crit} et W' devraient être non significatives.

II. Revue de littérature

1) Le concept de puissance critique (P_{crit})

Kennelly (1906) est le premier chercheur à aborder la forme de relation qui lie la vitesse au temps. En effet, il s'est intéressé à la relation entre les vitesses maintenues lors des records du monde en fonction de la durée des épreuves. Sa formule permet d'estimer les temps limites (T_{lim}) des meilleurs coureurs mondiaux de l'époque sur des distances allant de 100 yards à 10 miles et se présente sous la forme ($y = ax^n$). L'équation 1 détermine T_{lim} en fonction de la distance de course auprès des meilleurs coureurs mondiaux, où t correspond au temps (en secondes) et s à la distance (en mètres) (Kennelly, 1906).

$$t = 0,0588s^{1,125} \quad (\text{Equation 1})$$

Par la suite, Hill (1927) revoit le modèle Kennelly (1906) et apporte une argumentation physiologique à la relation vitesse - temps. Il est le précurseur des concepts de consommation maximale d'oxygène et de dette d'oxygène qu'il utilise pour expliquer la forme hyperbolique de la relation vitesse-temps en natation et en course à pied, aussi bien pour les hommes que pour les femmes.

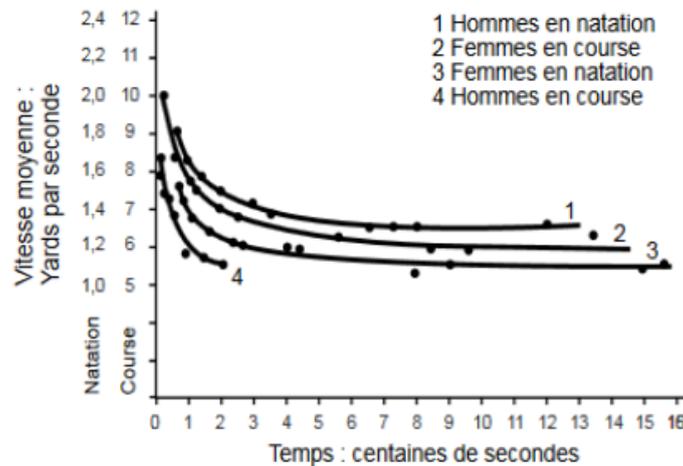


Figure 1: Relation vitesse - temps en course à pied et en natation (Hill, 1927) (adapté par Billat, 2003).

Par la suite, Henry et Farmer (1949) ont abordé la notion d'endurance par le "dropp off" index qui se définit comme un index d'endurance mesuré par la différence entre le temps requis sur 300 yards et le temps mis pour courir 70 yards. Cet index était corrélé avec la sensation subjective et l'état d'entraînement des athlètes.

Scherer et coll. (1954), Scherer et Monod (1960) et Monod et Scherer (1965) se sont ensuite inspirés des travaux de Hill (1927) et Henry (1949) pour déterminer le concept de puissance critique sur des exercices musculaires locaux réalisés entre 4 et 30 minutes et qui sollicitent moins d'un tiers de la masse musculaire. Effectivement, leurs travaux ont mis en avant la forme hyperbolique de la relation entre la durée maximale d'un exercice et la $P_{méca}$ développée. Mais ils ont surtout montré l'existence d'une relation linéaire entre le T_{lim} de maintien d'un exercice et la quantité de travail (W_{lim}) réalisée où "b" correspond à la P_{crit} et "a" à la capacité maximale anaérobie du sujet (Equation 2).

$$W_{lim} = a + b T_{lim} \quad (\text{Equation 2})$$

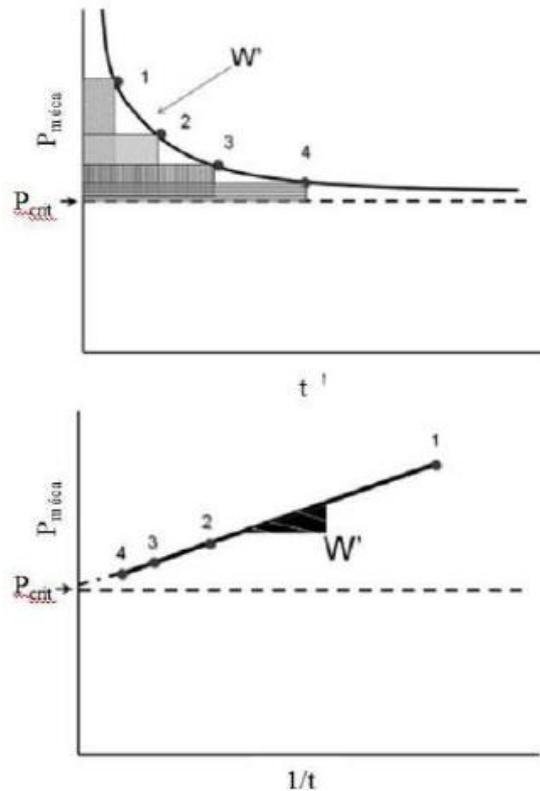


Figure 2: Illustration de la relation $P_{méca}$ - temps. Les chiffres 1 à 4 représentent les $P_{méca}$ atteintes en fonction de durées d'épuisements différentes. Puis, détermination de la P_{crit} et W' à partir de la relation $P_{méca}$ - $1/t$ (adaptée par Jones et coll., 2009).

« a » correspond à l'ordonnée à l'origine et se définit comme une composante dans la production d'énergie par la voie anaérobie appelée W' pouvant être utilisée à tout moment d'un exercice et aboutissant à l'épuisement lorsqu'elle est totalement consommée. Tout exercice effectué au-dessus de la P_{crit} conduit à une diminution des réserves anaérobies et donc de W' .

Quant au paramètre « b », il correspond à la pente de la droite et donc à la puissance P_{crit} . En théorie, si le sujet réalisait un exercice à une $P_{méca}$ égale au paramètre b, le temps de maintien serait alors infini (dénominateur égal à zéro). Mais Vandewalle (2008) montre qu'il est en fait possible de maintenir P_{crit} pendant une période de temps prolongée (dépend de l'entraînement des sujets).

Moritani et coll. (1981) ont décrit le modèle de la P_{crit} en 4 points:

- L'énergie produite pendant l'exercice provient des voies aérobie et anaérobies et leur part dans la fourniture énergétique dépend de l'intensité de l'exercice.

- La capacité aérobie (quantité totale d'énergie produite) est illimitée mais la puissance (quantité maximale d'énergie par unité de temps) de ce système est limitée par la P_{crit} .
- La capacité anaérobie (W') est quant à elle limitée mais pas la puissance.
- L'incapacité de poursuivre un effort intervient lorsque W' est épuisé.

Cependant le modèle de Monod et Scherer a des limites car la relation n'est établie que sur des exercices relativement courts, c'est-à-dire entre 4 et 30 minutes. De plus, la relation est tracée à partir de 4 tests de T_{lim} à une intensité donnée. Ces tests nécessitent plusieurs jours pour être réalisés afin que la fatigue n'influence pas la performance. Cependant Karsten et coll. (2015) ont montré qu'il était possible de déterminer la P_{crit} à partir de 3 tests "all-out" de 3, 7 et 12 minutes avec 30 minutes de récupération entre chaque test.

D'autres auteurs se sont donc penchés sur d'autres méthodes de détermination de la P_{crit} . Vanhatalo et coll. (2007) ont développé un test où le sujet réalise un effort « all-out » sur 3 minutes, c'est-à-dire qu'il donne le maximum sans gérer l'effort dès la première seconde jusqu'à la fin des 3 minutes. La $P_{méca}$ atteint son maximum dans les premières secondes et décroît jusqu'à épuiser la capacité de travail anaérobie (W') avant de se maintenir à un plateau dans la dernière minute. La $P_{méca}$ moyenne des 30 dernières secondes correspond à la P_{crit} (figure 3).

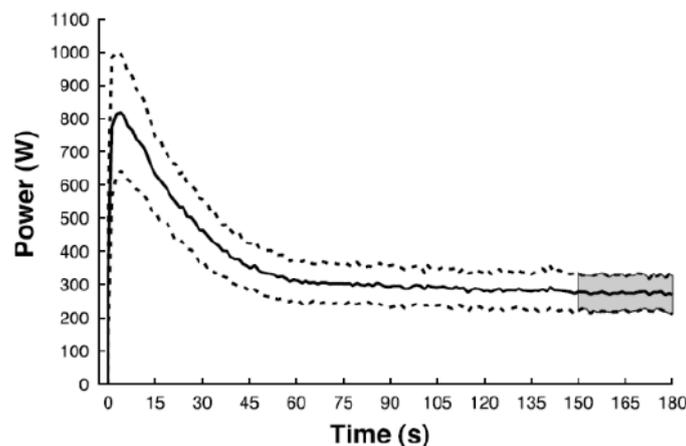


Figure 3: Evolution de la $P_{méca}$ lors d'un test "all-out" de 14 sujets. La ligne noire correspond à la puissance moyenne et les lignes en pointillés représentent l'écart-type. La zone grisée correspond aux 30 dernières secondes. La $P_{méca}$ moyenne durant ses 30 dernières secondes correspond à la P_{crit}

De nombreux auteurs se sont intéressés à la validation et à la répétabilité de ce test pour évaluer la P_{crit} et W' (Burnley et coll., 2006 ; Vanhatalo et coll., 2007, 2008a, 2008b ;

Vanhatalo et Jones, 2009 ; Francis J. T. et coll., 2010 ; Chidnok et coll., 2012 ; Black et coll., 2014). Mais il semble qu'il possède certaines limites car il dépendrait des conditions dans lesquelles il a été effectué. L'ergomètre utilisé, la cadence et l'échauffement influenceraient la P_{crit} et W' (Bergstrom et coll., 2013a, 2013b ; Karsten, et coll., 2014).

L'utilisation du Profil de Puissance Record (Pinot et Grappe, 2011) en cyclisme pour définir la P_{crit} et le W' peut être un concept intéressant car il regroupe l'ensemble des $P_{méca}$ records à l'entraînement et à la compétition sur un intervalle de temps très large : de quelques secondes à plusieurs heures. Il permet ainsi de déterminer les forces et faiblesses du cycliste (figure 4). Ainsi, en regroupant les $P_{méca}$ records comprises entre 4 et 30 minutes on pourrait obtenir une P_{crit} et un W' précis et propre à chaque individu, et avec un nombre de données suffisant pour effectuer une relation linéaire entre le T_{lim} et le W_{lim} . En revanche, ce processus nécessite un PPR valide.

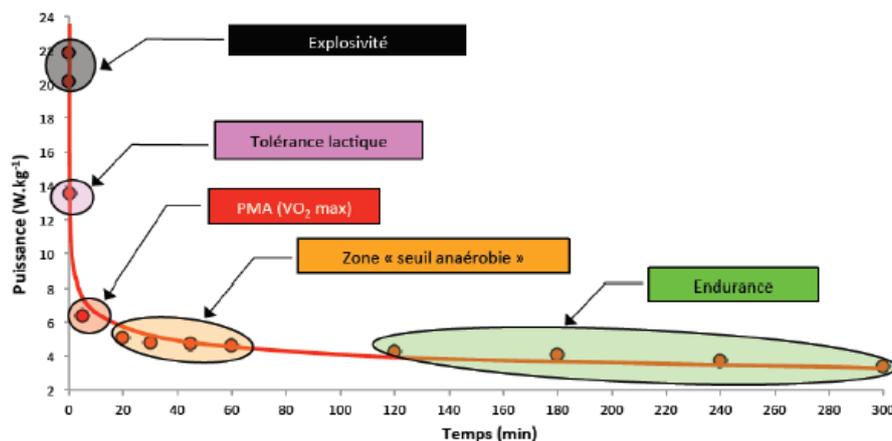


Figure 4: Profil de puissance record qui permet de déterminer les différentes aptitudes physiques du cycliste (Grappe, 2012).

2) Les fondements physiologiques de la P_{crit} et de W'

De nombreux auteurs se sont intéressés aux réponses physiologiques d'un exercice effectué à P_{crit} .

Moritani et coll. (1981) ont étudié la relation entre W_{lim} et le T_{lim} lors d'exercices réalisés à des puissances supra maximales (supérieures à la puissance maximale aérobie) sur bicyclette ergométrique. Cette étude montre que la puissance critique ainsi déterminée était proche de la puissance correspondant au seuil anaérobie ventilatoire.

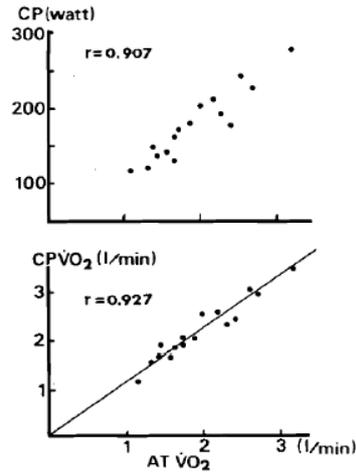


Figure 5 : Relation entre le Seuil Anaérobie ($AT\ VO_2$) et la P_{crit} ($CP\ VO_2$). En haut : relation entre $P_{méca}$ (en Watts) et VO_2 (l/min). En bas : relation entre la consommation d' O_2 à P_{crit} et la consommation d' O_2 au seuil anaérobie (AT).

Poole et coll. (1988) ont réalisé une étude auprès de 8 sujets entraînés. Ils ont observé que la P_{crit} correspondait à environ 80% de VO_{2max} et représentait le plus haut niveau de $P_{méca}$ qui permettait d'atteindre une stabilisation de la VO_2 et du lactate. Lorsque le sujet devait maintenir une $P_{méca}$ supérieure de 5% à la P_{crit} , la VO_2 et le lactate sanguin dérivait dans le temps (figure 6). La P_{crit} a donc été définie comme étant l'intensité d'exercice la plus élevée stimulant le métabolisme aérobie.

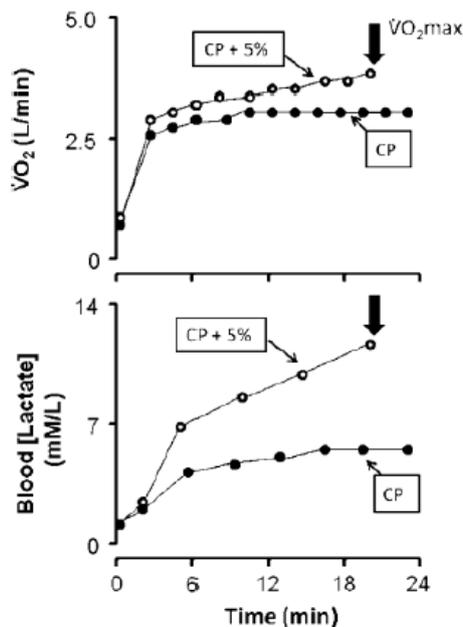


Figure 6 : Réponse de la consommation d'oxygène et du lactate sanguin à une $P_{méca}$ constante. Les points noirs correspondent à une $P_{méca}$ égale à la P_{crit} . Les points blancs à une $P_{méca}$ 5% supérieure à la P_{crit} (Poole et coll. 1988).

Le Chevalier et coll. (2000) ont montré que cette P_{crit} est un indice d'endurance locale car elle est très proche de la limite supérieure des états stables concernant la consommation d'oxygène, la lactatémie, l'activation musculaire (appréciée par l'intermédiaire de l'EMG intégré). Seule la fréquence cardiaque mesurée aux cours d'exercices réalisés à la puissance critique montrait une dérive progressive, légère mais significative.

Jones et coll. (2010) ont montré les évolutions de Ph sanguin, de Phosphocréatines (PCr) et de Phosphates inorganiques (Pi) musculaires chez 6 sujets entraînés à des intensités supérieures ou égales à la P_{crit} . Le Ph sanguin et les concentrations en Pi et PCr sont stables lorsque l'exercice est effectué à P_{crit} . En revanche pour une $P_{méca}$ supérieure à P_{crit} (10%), le Ph sanguin et le taux de PCr diminuent. Quant au taux de Pi, celui-ci est 5 fois plus important que pour un exercice égal à P_{crit} (Figure 7).

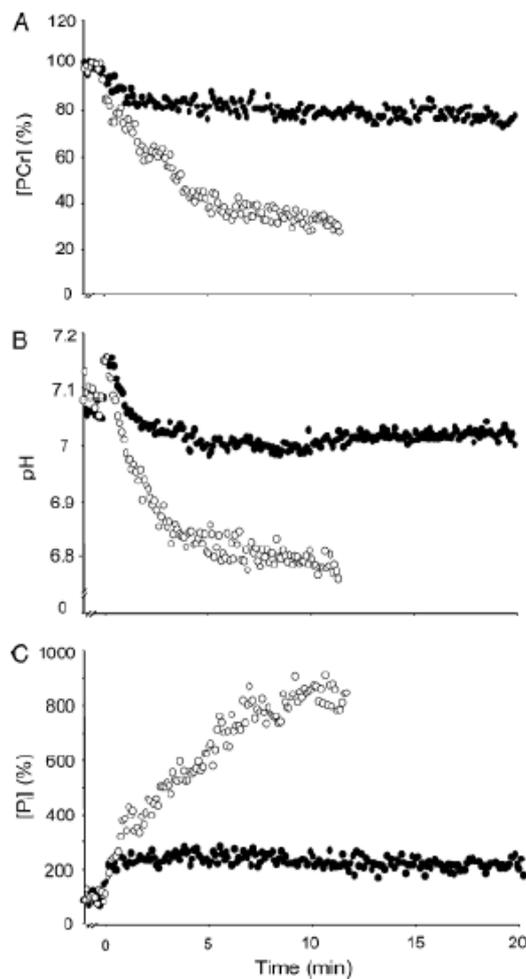


Figure 7: évolution du Ph sanguin, PCr et Pi musculaire au cours d'exercices effectués à P_{crit} (Points noirs) et 10% supérieurs à P_{crit} (Points blancs). La concentration en Pi et PCr est exprimée en % de l'état basal. (Jones et coll. 2008).

En résumé, la P_{crit} représente un seuil critique du contrôle métabolique musculaire au-dessus duquel tous les exercices conduisent automatiquement plus ou moins vite à l'épuisement du sujet en fonction de $P_{méca}$ maintenue (Grappe 2012).

Concernant W' , elle correspond à la capacité de travail anaérobie (en J) et au travail mécanique réalisé au-dessus de la P_{crit} (Figure 8). En effet, W' correspond à la courbure de la relation $P_{méca}/$ Temps. Plusieurs auteurs (Chidnok et coll. 2012 et Ferguson et coll. ,2007) ont montré que cette réserve est dépensée lorsque la $P_{méca}$ est au-dessus de la P_{crit} et est reconstituée lorsque l'intensité est en dessous de P_{crit} . Ainsi, en théorie, lorsque W' est entièrement dépensée, l'athlète ne peut plus continuer l'exercice

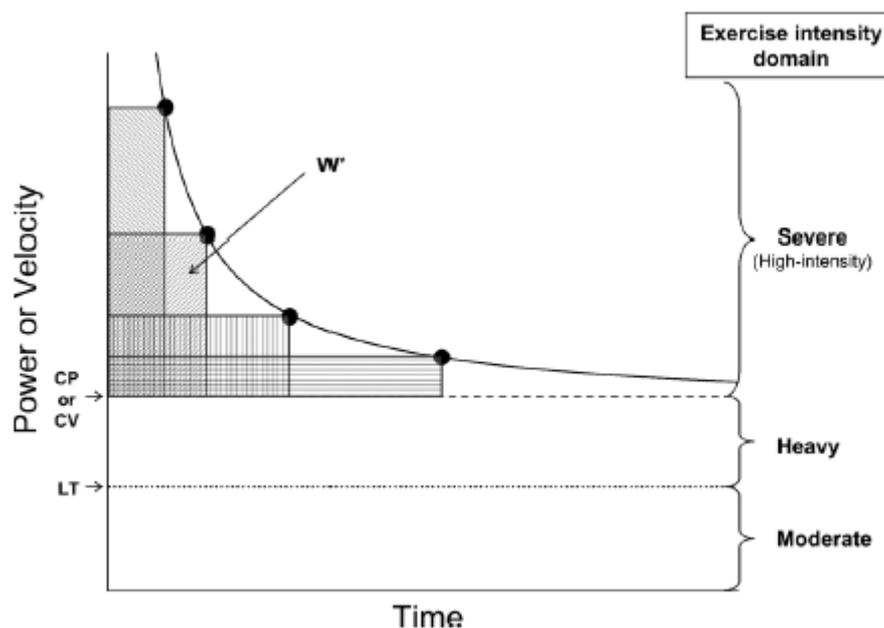


Figure 8: Illustration de la relation Puissance - Temps. La partie Grisée correspond à W' . Tout exercice réalisé au-dessus de P_{crit} nécessite l'intervention du système anaérobie et donc l'utilisation de cette réserve anaérobie pour pouvoir poursuivre l'exercice.

Skiba et coll. (2012) ont mis au point une formule permettant de calculer en temps réel le niveau de W'_{BAL} utilisé pendant un exercice. L'équation 3 montre la méthode de calcul du W'_{BAL} selon Skiba et coll. (2012) où W'_{exp} correspond au W' utilisé, $-(t-u)$ correspond au temps passé en dessous de la P_{crit} , et $t'w'$ est une constante de temps de reconstitution de W' .

$$W'_{BAL} = W' - \int_0^t W'_{exp} \cdot e^{\frac{-(t-u)}{t'w'}} \cdot du \quad (\text{Equation 3})$$

En d'autres termes, lorsque l'exercice est effectué au-dessus de P_{crit} , les réserves anaérobies diminuent et W'_{Bal} également. En revanche, lorsque la puissance est inférieure à cette P_{crit} , les réserves anaérobies se reconstituent et W'_{Bal} aussi. Ce terme de W'_{Bal} peut ainsi être considéré comme une batterie pour l'athlète. Lorsque les réserves W'_{Bal} sont épuisées, le sujet ne peut plus poursuivre son effort.

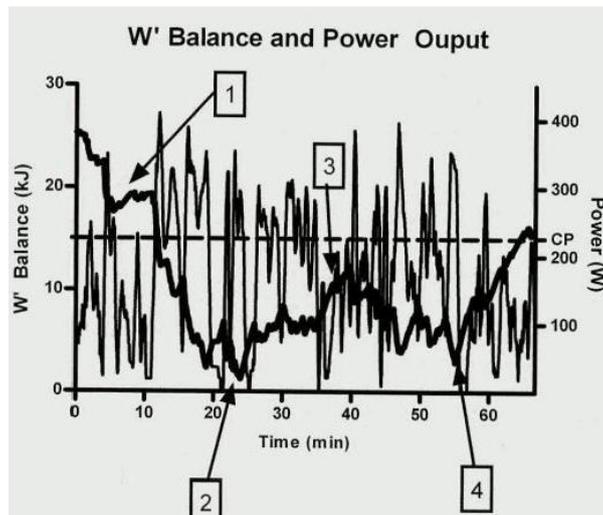


Figure 9 : Exemple de l'utilisation du modèle W'_{Bal} . La courbe noire foncée correspond au W'_{Bal} alors que la courbe noire correspond à la $P_{méca}$. (Skiba et coll. 2012).

La figure 9 démontre la déplétion du W'_{Bal} pendant une compétition sur route. On observe que lorsque la $P_{méca}$ est supérieure à la P_{crit} la réserve anaérobie W' diminue et l'effet inverse se produit lorsque la $P_{méca}$ est inférieure à P_{crit} . Skiba (2012) distingue 4 phases durant cet effort de 60 minutes. La première constitue une phase où le coureur se positionne dans le peloton. La $P_{méca}$ est assez faible ce qui permet au coureur de ne pas épuiser son W' . La phase suivante correspond à une attaque. La 3ème correspond à une échappée. Enfin la dernière correspond au moment où le coureur se fait lâcher du peloton. On remarque que W'_{bal} est étroitement lié à la $P_{méca}$ développée. Ce concept peut donc être intéressant en compétition mais aussi à l'entraînement afin d'ajuster par exemple, le nombre de répétitions dans une séance d' HIT (High Interval Training) si l'on souhaite que le coureur arrive à épuisement.

D'un point de vue physiologique, d'après Di Prampero (1999) et Miura et coll. (1999), cette réserve anaérobie provient principalement de l'énergie dérivée de la dégradation de PCr intramusculaire et du glycogène (musculaire et hépatique). Fitts (1994) montre aussi que la différence de W' entre les athlètes dépendrait de la capacité des sujets à supporter les

métabolites issus de la fatigue tels que les ions H⁺. Certaines études ont également rapporté que W' était intrinsèquement reliée au développement de la composition lente de VO₂ (Ferguson et coll. ,2007). W' est également dépendante de la constante de courbure de la courbe P_{méca} – temps et par conséquent de la grandeur de la zone d'intensité difficile (différence entre la P_{crit} et VO_{2max}) (Vanhatalo et coll. 2010). Les cyclistes possédant une P_{crit} élevée relative à leur VO_{2max} (zone d'intensité étroite) ont des valeurs de W' assez basses (< 15 Kj). Alors que les cyclistes sprinteurs tendent à avoir une faible P_{crit} relative à leur VO_{2max} (zone difficile étendue) et ont des valeurs de W' beaucoup plus hautes (> 25 Kj) (Vanhatalo et coll. 2011).

Cette revue de littérature permet de montrer que la P_{crit} est un concept assez complexe. Elle permettrait tout de même de différencier les exercices "lourds" et "sévères", et correspondrait à l'intensité d'exercice la plus élevée stimulant le métabolisme aérobie. De plus elle serait utile pour les entraîneurs afin de calibrer des séances d'entraînements mais aussi pour déterminer un T_{lim} pour une P_{méca} donnée (exercice d'une durée maximale de 30 minutes). De plus, elle peut être facilement mesurée en réalisant plusieurs T_{lim} ou grâce à un test all-out de 3 minutes. L'utilisation du PPR serait aussi un moyen intéressant pour la déterminer à condition que celui-ci soit valide.

III. Méthodologie

1) Sujets

***Tableau 1** : Caractéristiques des sujets.*

	Nombre	Age	Taille (m)	Poids (kg)
Polyvalentes	3	22,7 ± 2,5	1,69 ± 3,5 cm	55,7 ± 4
Rouleuses	2	27,5 ± 3,5	1,64 ± 8,5 cm	60,5 ± 3,5
Sprinteuse	1	26	1,68	64
Grimpeuse	1	30	1,74	57

7 cyclistes féminines de l'équipe FDJ Nouvelle-Aquitaine Futuroscope ont participé à cette étude (âge : 25,6 ± 3 ans ; taille : 167,5 ± 5,6cm ; poids : 58 ± 4,1kg). Parmi ces cyclistes, 4 d'entre elles sont professionnelles et 2 sont en catégorie espoir. Elles effectuent entre 15 et 20 000 Km par an et participent à environ 60 jours de course.

Ces cyclistes étaient divisés en 4 groupes. Les sprinteuses, les grimpeuses, les rouleuses, et les polyvalentes

Les grimpeuses sont les cyclistes excellant dans les cols. Elles sont à leurs avantages dans les cols et les courses montagneuses. Leur rapport poids-puissance leur permet d'être à leur avantage dès que la route s'élève.

Les sprinteuses ont une excellente pointe de vitesse. Elles disposent d'une proportion de fibres rapides plus importante dans les membres inférieurs leur permettant ainsi de développer des hauts niveaux de puissances sur des périodes très courtes.

Les rouleuses sont les cyclistes ayant la capacité de développer des hauts niveaux de puissance lors des prologues et des contre la montre. Elles disposent d'un seuil anaérobie élevé.

Les cyclistes polyvalentes n'excellent dans aucun des domaines précédents mais elles ont un profil intermédiaire.

2) Matériel

a) Tests d'évaluation de la VO_{2max}



Photo 1 : Test d'évaluation en laboratoire la consommation maximale d'oxygène (VO_{2max}) à l'aide du Métamax.

La mesure de la $P_{méca}$ lors des tests en laboratoire a été effectuée avec le SRM Indoortrainer (Photo 1). La calibration (« OFFSET ») a été effectuée avant chaque test à partir d'une procédure réalisable en routine qui prend en compte la température du lieu ainsi que le couple

résiduel de la chaîne sur le pédalier, selon les recommandations du constructeur. La pente d'étalonnage correspond à :

$$\text{Pente} = \text{fréquence mesurée (Hz.m)} / \text{Couple appliquée sur la pédale (N.m-1)} \quad (\text{Equation 4})$$

Dans le cas présent, la pente correspondait à 37,0 Hz/N.m-1. Une variation de la valeur de calibrage Hz0 de 10 Hz et de la pente de 0,1 Hz/N.m détermine une erreur de mesure de 0,5 %.

En plus de la $P_{\text{méca}}$, la consommation d'oxygène (VO_2) a été mesurée grâce au système portatif Métamax (Cortex Biophysik GmbH, Leipzig, Germany). Cet appareil mesure à chaque cycle respiratoire la ventilation et les concentrations en O_2 et CO_2 présentes dans ces volumes. D'autres variables ont été mesurées comme la fréquence cardiaque (en bpm) et la cadence de pédalage (RPM).

b) Mesure de la $P_{\text{méca}}$ à l'entraînement et en compétition

Plusieurs capteurs de puissance ont été utilisés afin de recueillir les données de $P_{\text{méca}}$ à l'entraînement et en compétition. La roue arrière Powertap (Madison, USA), le pédalier SRM (Schoberer, Germany) et l'étoile Pioneer (Tokyo, Japon). Chaque capteur a été calibré selon les recommandations du constructeur avant le recueil des données afin d'obtenir des données de $P_{\text{méca}}$ les plus précises possibles. L'ensemble des données ont été recueillies via le système ANT+ à un moniteur type « Garmin ». La fréquence d'échantillonnage correspondait à 1 Hz. Les données de $P_{\text{méca}}$ ont été analysées avec le logiciel GoldenCheetah.

3) Protocole des tests de laboratoire

Les tests de laboratoire visaient à évaluer les qualités d'explosivité, de tolérance lactique mais aussi à mesurer la Puissance Maximale Aérobie (PMA) des coureuses.

Les tests Force-Vitesse (Pérès et coll., 1981 ; Vandewalle et coll., 1985 ; Pirnay et Crielaard, 1979) évaluent l'explosivité du sujet. L'épreuve consistait en la réalisation de 3 sprints à charge croissante (0,7 N.kg = « sprint vitesse » ; 0,9 N.kg = « Sprint modéré » ; 1,1 N.kg = « Sprint force »). L'indice d'explosivité se mesurait ensuite en divisant la valeur maximale obtenue sur chaque sprint par le poids du sujet.

Le test Wingate (Ayalon et coll., 1974 ; Bar-Or et coll., 1988) quant à lui évalue la capacité du coureur à effectuer un sprint long et donc sa capacité de tolérance au lactate. Le test consistait à réaliser un sprint maximal de 30 secondes. Une résistance de 0,9 N.kg était

utilisée lors de ce test. La $P_{méca}$ moyenne était ensuite mesurée sur la totalité de l'effort. Un indice de fatigue était aussi mesuré.

Le test PMA détermine le potentiel aérobique maximal de l'athlète. Il consistait en un test triangulaire où le sujet réalisait un exercice par paliers d'intensité progressive. Le sujet débute le test à faible intensité (100W), puis l'incrémentation se fait de manière régulière (augmentation de 30 W) et constante (2 minutes). Le test se termine lorsque que le sujet est dans l'incapacité de poursuivre son effort. La PMA est ensuite calculée de la manière suivante (Grappe, 2012) :

$$PMA = P_{méca \text{ avant dernier palier}} + [(P_{méca \text{ dernier palier}} - P_{méca \text{ avant dernier palier}}) \times t_{\text{dernier palier}}] \quad (\text{Equation 5})$$

4) Détermination du profil des coureuses

Le profil des cyclistes (grimpeuse, rouleuse, sprinteuse ou polyvalente) a été défini selon les performances effectuées en compétition mais aussi en utilisant les données des tests de laboratoire. Il est important de noter que ces paramètres ne sont pas les seuls déterminants de la performance dans chaque domaine, mais couplés aux résultats obtenus en compétition, ils permettent d'affirmer le profil de chaque cycliste.

Les paramètres utilisés sont les suivants :

- La P_{max} relative (en W/kg) obtenue lors des tests force/vitesse.
- La P_{moy} (en W/kg) obtenue lors du test Wingate.
- La VO_{2max} , la PMA et le SV2 (méthode de Wasserman, 1994) résultants du test incrémental

5) Détermination de CP et W'

Afin de déterminer la P_{crit} et le W' , un Profil de Puissance Record (PPR) a été préalablement établi. Le recueil des données de $P_{méca}$ de chaque sujet a été effectué à la fin de chaque entraînement ou compétition afin d'obtenir la courbe curvilinéaire entre la $P_{méca}$ et la durée de l'exercice (en sec) selon la méthode de Pinot et Grappe (2011). Ensuite, l'ensemble des $P_{méca}$ records 4, 5, 7, 10, 20 et 30 minutes était nécessaire afin de calculer la relation entre le t_{lim} et le W_{lim} définie par Monod et Scherrer (1965) décrite par la relation suivante :

$$W_{lim} = a + b \times t_{lim} \quad (\text{Equation 6})$$

6) Analyse statistique

L'analyse statistique a été réalisée avec le logiciel XL STAT (Addinsoft, Paris, France). Pour l'ensemble des variables, les moyennes et les écarts types ont été calculés. Un PPR a été réalisé afin de recueillir l'ensemble des données de $P_{méca}$ records de chaque sujet. Un coefficient de corrélation (Pearson) a été calculé entre les P_{crit} et les valeurs de VO_{2max} mais aussi entre le SV2 et la P_{crit} , entre la P_{max} relative obtenue lors des tests force vitesse et W' , entre la P_{moy} relative obtenue lors du test Wingate et W' et entre la VO_{2max} et W' . Aucun test de significativité n'a été réalisé car le nombre de sujets par groupe était insuffisant.

IV. Résultats

1) Tests de laboratoire

L'ensemble des résultats obtenus lors des tests de laboratoire sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau 2 : Représentation des VO_{2max} , PMA P_{max} et P_{moy} Wingate obtenues lors des tests de laboratoire en fonction des différents profils de coureurs.

	VO_{2max} (ml/min/kg)	PMA (W/kg)	P_{max} (W/kg)	P_{moy} 30"(W/kg)
Grimpeuse	74	5,91	12,19	11,61
Sprinteuse	60	4,98	14,86	10,06
Rouleuses	64 ± 2,12	4,94 ± 0,53	13,16 ± 0,33	9,27 ± 0,42
Polyvalentes	64 ± 2,52	5,05 ± 0,19	11,88 ± 2,04	8,81 ± 1,1

Le tableau ci-dessus montre que le profil « grimpeuse » dispose d'une consommation maximale d'oxygène supérieure aux autres profils. La sprinteuse dispose de la VO_{2max} la moins importante du groupe mais d'une P_{max} relative supérieure aux autres groupes de coureurs.

2) Calcul de la P_{crit} et W' :

L'ensemble des $P_{méca}$ records comprises entre 4 et 30 minutes étaient nécessaires afin de calculer P_{crit} et W' :

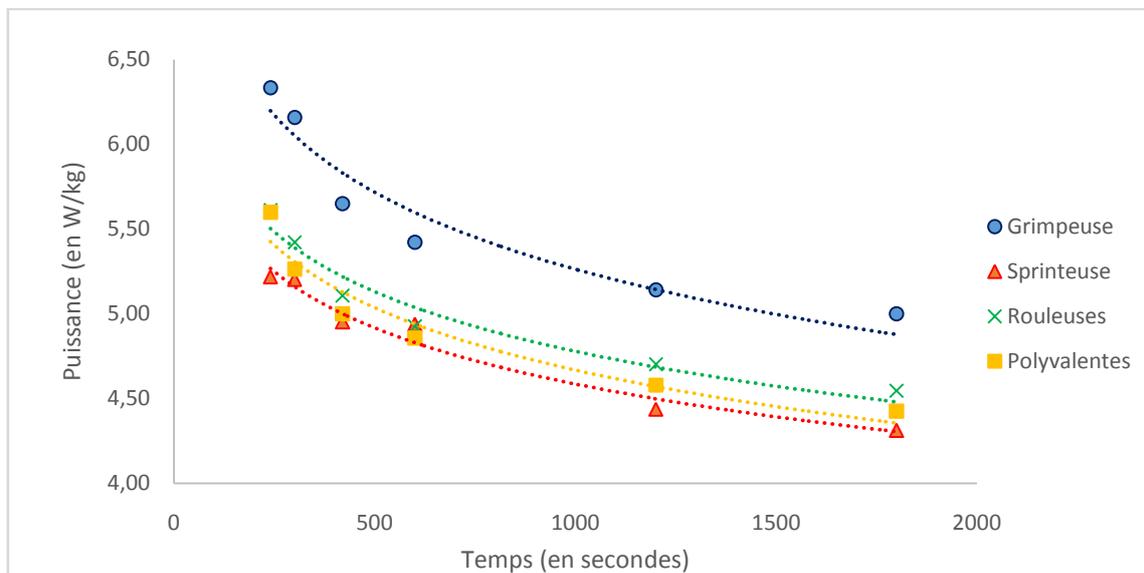


Figure 11 : ensemble des $P_{méca}$ records relatives (W/kg) regroupées par spécialité. La puissance relative a été moyennée pour les cyclistes rouleuses et polyvalentes.

Le W_{lim} était ensuite calculé pour les différents groupes de cyclistes :

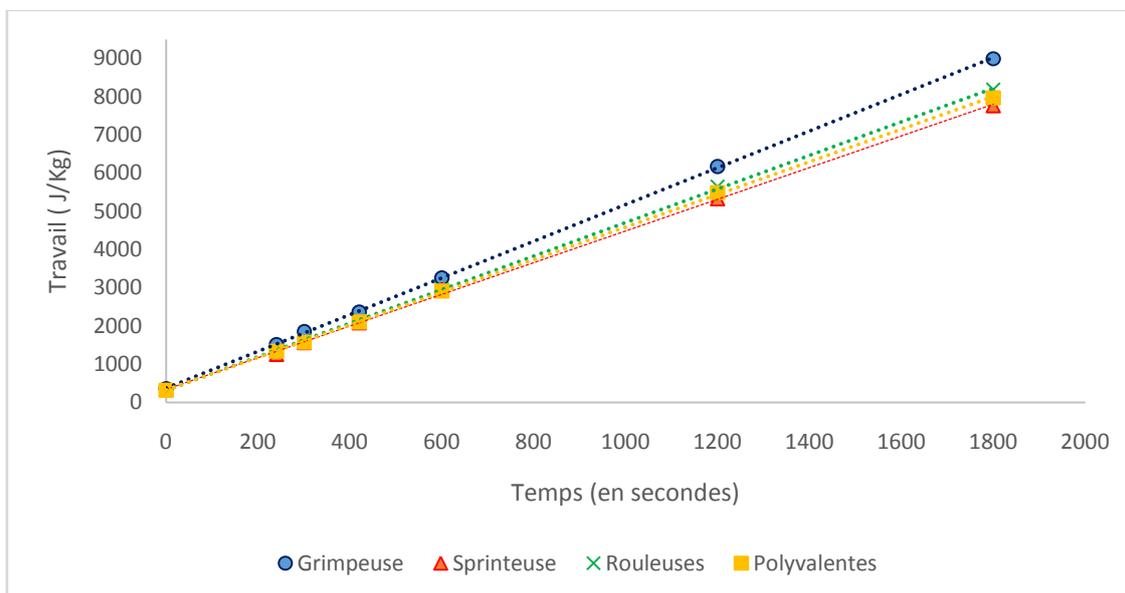


Figure 12 : Evolution du W_{lim} en fonction des différentes spécialités (les écarts-types n'ont pas été introduits dans les graphiques des $P_{méca}$ records et W_{lim} afin de faciliter la lecture des différentes figures).

L'ensemble des valeurs de P_{crit} et de W' ont été calculées de la manière suivante :

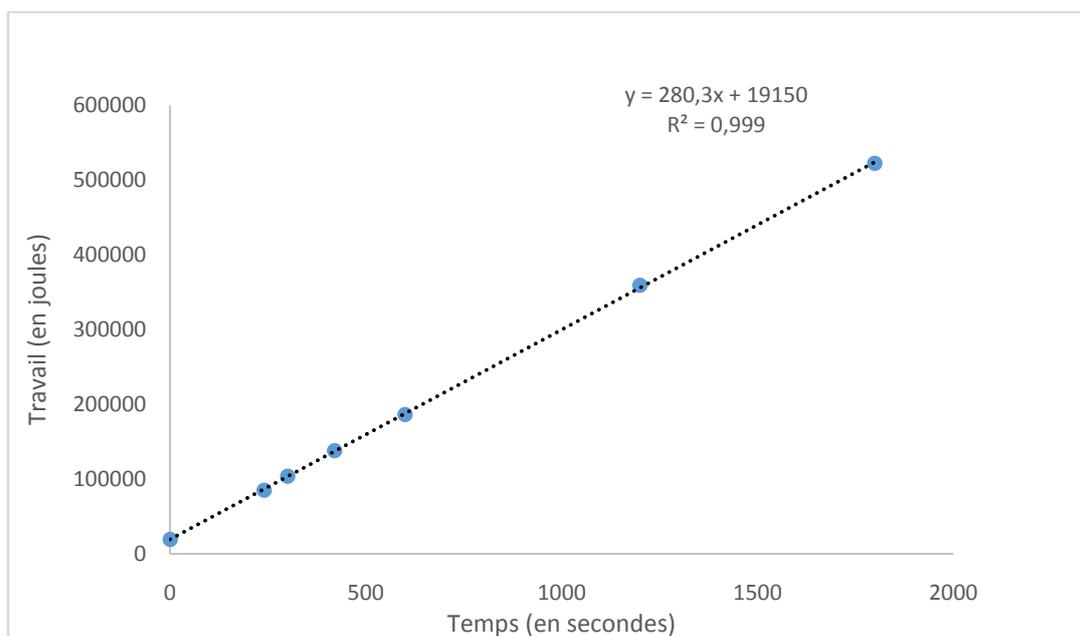


Figure 10 : : Méthode de détermination de P_{crit} et W' chez une cycliste « rouleuse » à partir des $P_{méca}$ records du PPR. Le W_{lim} (produit de la puissance par le temps) augmente de façon presque linéaire ($R^2= 0,99$) entre 4 et 30 minutes. La relation tracée entre ces points permet de définir la P_{crit} et W' . Ici, la P_{crit} correspond à la pente de la droite soit 280 W et la réserve anaérobie W' à l'ordonnée à l'origine soit 19150 joules (19,1 Kj).

L'ensemble des valeurs de P_{crit} et W' sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 3 : P_{crit} et W' suivant le profil de coureur.

	P_{crit} (W)	P_{crit} (W/kg)	W' (Kj)
Grimpeuse	275	4,82	20,9
Rouleuses	266 ±21	4,39 ±0,1	18,8 ±0,6
Sprinteuse	265	4,14	21,9
Polyvalentes	239 ±25	4,28 ±0,2	17,4 ±3

3) Tests de corrélation :

a) Entre P_{crit} et W' :

Une faible corrélation négative ($r = -0,57$; $p > 0,05$) a été trouvée entre P_{crit} et W' selon le profil des cyclistes.

b) en relation avec la P_{crit} :

Tableau 4 : Comparaison entre P_{crit} et VO_{2max} selon le profil des coureurs.

	P_{crit} (W/kg)	VO_{2max} (ml/min/kg)
Grimpeuse	4,82	74
Rouleuses	4,39 \pm 0,08	64 \pm 2,1
Polyvalentes	4,28 \pm 0,18	64 \pm 2,5
Sprinteuse	4,14	60

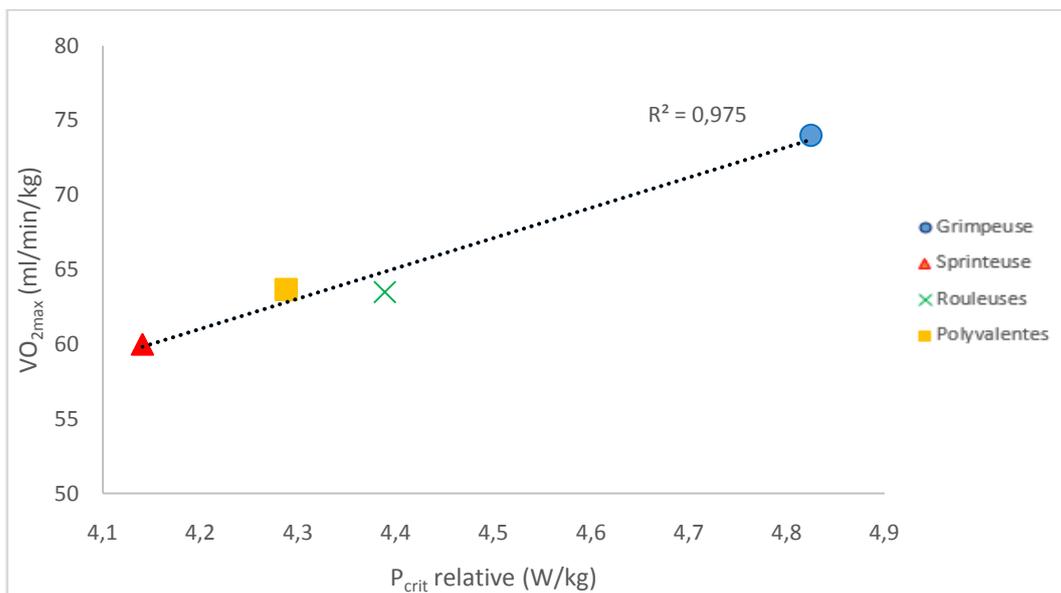


Figure 13 : Relation entre la P_{crit} relative et la VO_{2max} selon le profil des coureurs.

Une très forte corrélation $r = 0,98$ ($p = 0,01$) a été établie entre la P_{crit} relative et la VO_{2max} selon le profil des cyclistes. Plus la P_{crit} augmente et plus la VO_{2max} est importante.

Tableau 5 : Comparaison entre la P_{crit} et la $P_{méca}$ relative à SV2.

	P_{crit} (W/kg)	$P_{méca}$ SV2 (W/kg)
Grimpeuse	4,82	4,91
Rouleuses	4,39 \pm 0,08	4,16 \pm 0,04
Polyvalentes	4,28 \pm 0,18	4,25 \pm 0,11
Sprinteuse	4,14	3,91

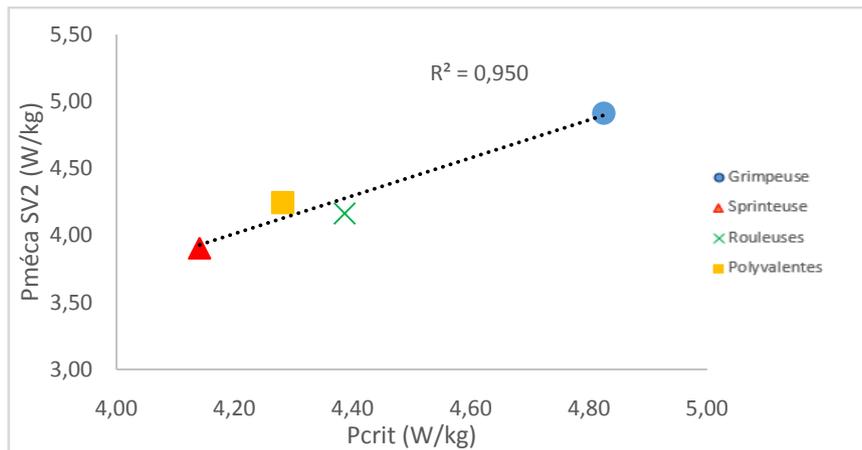


Figure 14 : Relation entre P_{crit} et la $P_{méca}$ relative à SV2 selon le profil des coureurs.

Une très forte corrélation $r = 0,97$ ($p = 0,03$) a été établie entre la P_{crit} relative et la $P_{méca}$ relative au SV2 selon le profil des cyclistes.

b) en relation avec W' :

Tableau 6 : Comparaison entre la P_{max} relative (W/kg) et la réserve anaérobie W' .

	P_{max} (W/kg)	W' (Kj)
Sprinteuse	14,9	21,9
Rouleuses	$13,2 \pm 0,33$	$18,8 \pm 0,6$
Grimpeuse	12,2	20,9
Polyvalentes	$11,9 \pm 2,04$	$17,4 \pm 3$

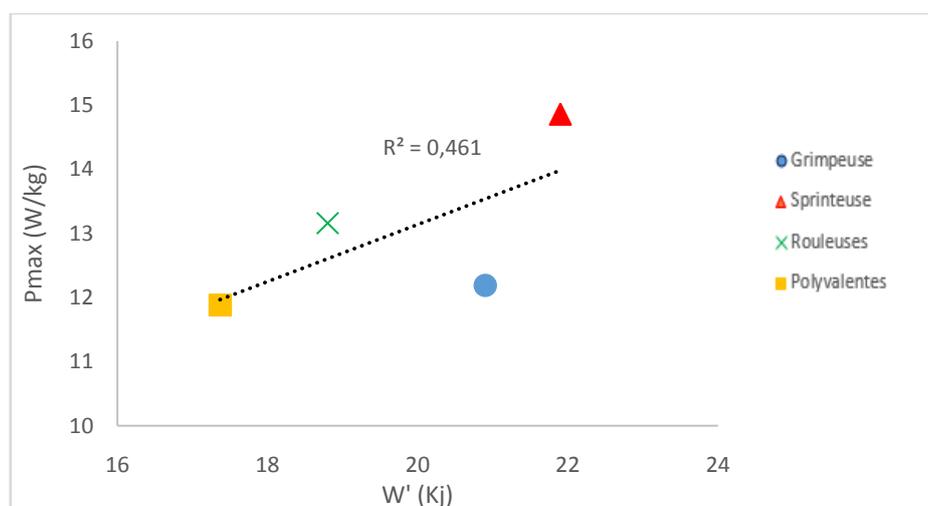


Figure 15 : Relation entre la réserve anaérobie W' et la P_{max} relative (W/kg).

Une forte corrélation $r = 0,68$ ($p > 0,05$) existe entre W' et la P_{\max} relative selon le profil des cyclistes.

Tableau 7 : Comparaison entre W' et la P_{moy} relative durant le test Wingate.

	W' (Kj)	$P_{\text{moy}} 30$ (W/kg)
Grimpeuse	20,9	11,61
Sprinteuse	21,9	10,06
Rouleuses	$18,8 \pm 0,6$	$9,27 \pm 0,42$
Polyvalentes	$17,4 \pm 3$	$8,81 \pm 1,11$

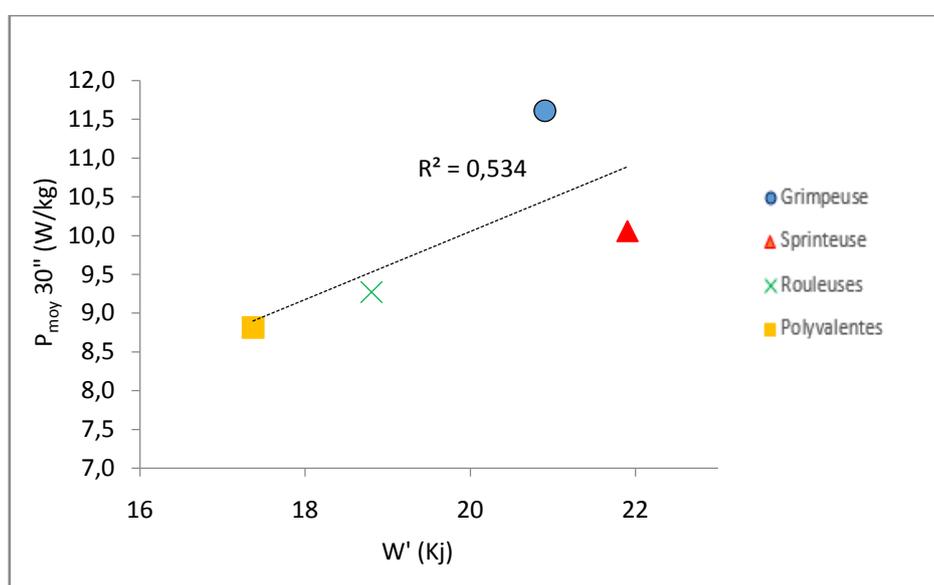


Figure 16 : Relation entre W' et la $P_{\text{moy}} 30''$ (W/kg).

Une faible corrélation $r = 0,27$ ($p > 0,05$) a été établie entre W' et la $P_{\text{moy}} 30''$ lors du test Wingate selon le profil des cyclistes.

Tableau 8 : Comparaison entre W' et $VO_{2\max}$.

	W' (Kj)	$VO_{2\max}$ (ml/min/kg)
Sprinteuse	22	60
Grimpeuse	21	74
Rouleuses	$18,8 \pm 0,6$	$64 \pm 2,1$
Polyvalentes	$17,4 \pm 3$	$64 \pm 2,5$

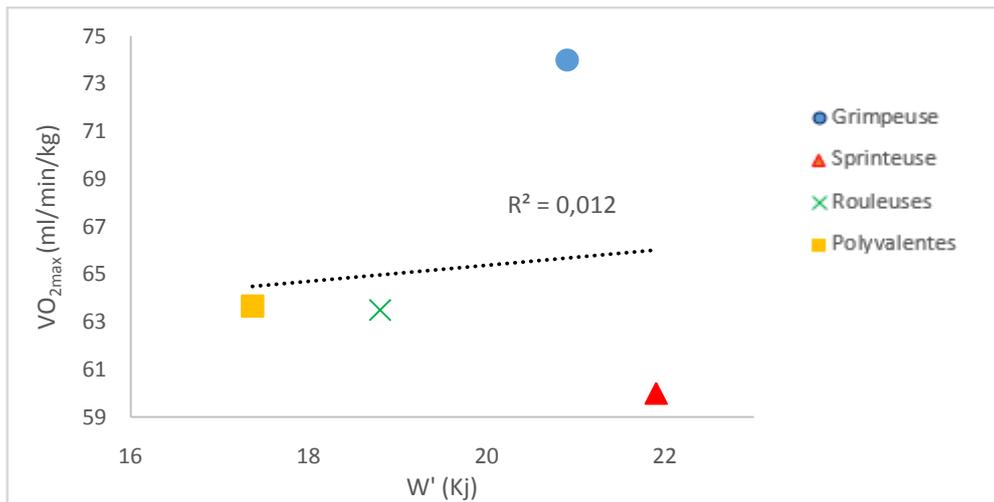


Figure 17 : Relation entre W' et VO_{2max} .

Une faible corrélation $r = 0,11$ ($p > 0,05$) existe entre W' et VO_{2max} selon le profil des cyclistes.

V. Discussion

Les résultats de cette étude montrent que la P_{crit} et le W' sont différents selon les profils des coureurs. Effectivement la grimpeuse dispose de la P_{crit} la plus élevée avec 275 W contre 266 W (± 21 W) pour les rouleuses, 265 W pour la sprinteuse et 239 W (± 25 W) pour les polyvalentes si l'on se penche uniquement sur les valeurs brutes. En revanche si on se réfère à la P_{crit} relative, les coureuses polyvalentes disposent d'une P_{crit} supérieure à la sprinteuse (4,28 W/kg contre 4,14 W/kg). La grimpeuse dispose toujours de la P_{crit} relative la plus élevée avec 4,82 W/kg contre 4,39 W/kg ($\pm 0,08$ W/kg) pour les rouleuses. Aucun test de significativité n'a pu être effectué pour vérifier s'il y avait des différences significatives entre les différents groupes de cyclistes car le nombre de sujets par groupe n'était pas assez important.

D'après Vanhatalo et coll. (2011), les cyclistes endurants type « grimpeurs » qui possèdent une P_{crit} élevée relative à leur VO_{2max} tendent généralement à avoir des valeurs de W' assez basses (> 15 Kj). Les sprinteurs quant à eux tendent à avoir une VO_{2max} moindre et donc une P_{crit} plus faible mais des valeurs de W' beaucoup plus hautes (> 25 Kj). Il semblerait ici qu'il n'existe pas de corrélation entre P_{crit} et W' ($r = -0,57$, $p > 0,05$). Les réserves anaérobies W' n'augmentent pas forcément lorsque la P_{crit} diminue. Les coureuses polyvalentes qui disposent

d'un W' le plus faible du groupe (17,4 Kj) devraient, selon Vanhatalo et coll. (2011), avoir une P_{crit} élevée. La grimpeuse, quant à elle, a la P_{crit} la plus élevée du groupe. Cependant elle ne possède pas des réserves anaérobies (W') les plus faibles (20,9 Kj).

Une très forte corrélation $r = 0,98$ ($p = 0,01$) existe entre la P_{crit} relative et la VO_{2max} . Effectivement, plus la P_{crit} augmente et plus la consommation maximale d'oxygène mesurée lors des tests de laboratoire augmente. Ces résultats semblent cohérents car plus la VO_{2max} est importante et plus la capacité à maintenir un haut niveau de $P_{méca}$ est importante. Ici, la grimpeuse dispose des $P_{méca}$ relatives les plus élevées et de la plus grosse VO_{2max} (74 ml/min/kg) alors que la sprinteuse dispose des $P_{méca}$ relatives les plus faibles et de la VO_{2max} la moins élevée (60 ml/min/kg). Ainsi, ces résultats rejoignent ceux de Vanhatalo et coll. (2011) et Burnley et coll. (2006).

Une très forte corrélation ($r = 0,97$, $p = 0,03$) a aussi été observée entre la P_{crit} et la $P_{méca}$ SV2. Effectivement, la relation entre la P_{crit} relative et la $P_{méca}$ relative atteinte à SV2 augmente de façon linéaire. Plus la P_{crit} des sujets est importante et plus leur $P_{méca}$ SV2 obtenue lors des tests de laboratoire est importante. Ces résultats sont en relation avec l'étude de Moritani et coll. (1981) qui ont démontré qu'il n'existait pas de différence significative entre le seuil anaérobie et la P_{crit} . Cela démontre que la P_{crit} représente bien un seuil critique du contrôle métabolique musculaire au-dessus duquel tous les exercices conduisent automatiquement plus ou moins vite à l'épuisement du sujet en fonction de la $P_{méca}$ maintenue. Pour la majeure partie des cyclistes (sauf la grimpeuse) la P_{crit} est légèrement supérieure au seuil anaérobie. Cela peut s'expliquer par le fait que les tests ont été effectués en début de saison (en Janvier) avant les premières compétitions. A cette période de l'année la majorité des coureuses n'avaient pas encore effectuées des entraînements intensifs. La P_{crit} semble donc un moyen efficace et moins onéreux qu'un test de laboratoire pour développer la capacité aérobie du coureur.

Les différences de W' entre les profils de coureuses semblent relativement faibles. Il semblerait tout de même que la sprinteuse bénéficie d'une réserve anaérobie légèrement supérieure aux autres profils. Cela pourrait s'expliquer du fait qu'elle dispose d'une courbure de la relation $P_{méca}$ - T_{lim} plus importante et donc d'une zone d'intensité difficile plus étendue (voir figure 8). La relation P_{max} - W' montre une forte corrélation ($r = 0,68$, $p > 0,05$) entre la P_{max} relative et W' . D'après Ferguson et coll. (2007), et Jones et coll. (2008), le paramètre W' correspond aux stocks de glycogène (musculaires et hépatiques) mais aussi à la PC_r intramusculaire. Lors d'un sprint, la PC_r est le substrat le plus utilisé dans la fourniture énergétique. Cela expliquerait que la quantité de PC_r serait plus importante chez la sprinteuse

et donc ses réserves anaérobies seraient supérieures. En revanche, une faible corrélation ($r = 0,27, p > 0,05$) a été établie entre $P_{\text{moy}} 30''$ et W' . Cette absence de corrélation pourrait venir du fait que certaines filles n'ont pas effectué le test Wingate correctement. Effectivement, un test Wingate s'effectue sans gestion avec un effort maximal durant la totalité du test. Or, on remarque que pour certaines filles, la courbe de $P_{\text{méca}}$ est relativement stable pendant les 30 secondes d'effort ce qui fausse les résultats des tests.

Les P_{crit} et W' ont été calculés à partir des $P_{\text{méca}}$ records comprises entre 4 et 30 minutes du PPR. Les valeurs de P_{crit} et W' sont donc dépendantes de la régression linéaire entre le W_{lim} et le T_{lim} et donc des valeurs de $P_{\text{méca}}$ obtenues à l'entraînement et en compétition. Cela signifie que les P_{crit} mesurées ici devraient être supérieures aux autres méthodes de détermination de la P_{crit} (ex : un test maximal "all-out" de 3 minutes). Pour un entraîneur qui souhaite utiliser la P_{crit} mesurée à l'aide du PPR, celui-ci doit être averti que son athlète ne dispose pas de la même forme physique en période hivernal qu'en période compétitive. Sassi et coll.(2008) ont notamment observé une augmentation significative de la PMA pour un groupe de 13 cyclistes professionnels entre la période de repos hivernal (418 ± 46 W), la fin de l'entraînement hivernal (443 ± 48 W) et la période compétitive (455 ± 48 W). Cela suggère que la P_{crit} serait elle aussi affectée par ces différentes périodes. L'utilisation de la P_{crit} à l'aide du PPR doit donc se faire en période compétitive. Cette méthode de détermination a ses limites car les $P_{\text{méca}}$ records qui ont permis de calculer cette P_{crit} ont été obtenues en montée. Lorsque le cycliste se déplace, celui-ci fait face à des résistances à l'avancement différentes selon la nature du terrain. Sur terrain plat les résistances à l'air (R_a) constituent le principal obstacle au déplacement. À 50 km.h^{-1} , environ 90% de la $P_{\text{méca}}$ est utilisée pour vaincre R_a , les résistances aux roulements (R_r) représentent seulement entre 7% et 10% de la $P_{\text{méca}}$ totale développée par le coureur. En revanche, lorsque la route s'élève, la vitesse diminue car le poids de l'ensemble coureur-bicyclette devient la résistance primordiale qui s'oppose au déplacement. L'utilisation de la P_{crit} à partir des valeurs du PPR s'appliquerait donc sur des efforts en montée.

La P_{crit} peut être aussi utile pour l'entraîneur afin de calibrer des intensités exercices relativement longs (jusqu'à 30 minutes). Effectivement, la P_{crit} permet de respecter le profil métabolique de chaque athlète. En effet, des sujets ayant des valeurs de PMA identiques n'ont pas la même relation puissance - temps. Par exemple les rouleuses disposent d'une PMA relative semblable à la sprinteuse ($4,98 \text{ W/kg}$ contre $4,94 \pm 0,54 \text{ W/kg}$) mais des valeurs de

P_{crit} différentes (4,14 W/kg pour la sprinteuse contre $4,39 \pm 0,1$ W/kg pour les rouleuses). Ainsi, si l'on se base uniquement sur un pourcentage de la PMA pour définir les zones d'intensité, la réponse métabolique entre les athlètes sera différente. L'utilisation de la P_{crit} pourrait ainsi être utile pour programmer des séances individualisées et qui visent au développement de la capacité aérobie tout en respectant la relation puissance - temps des cyclistes.

VI. Conclusion

L'objectif de l'étude était de déterminer la P_{crit} et W' auprès d'une équipe cycliste féminine professionnelle selon le profil de performance des sujets.

Les valeurs de P_{crit} semblent proportionnelles à la VO_{2max} des athlètes. Plus la VO_{2max} est élevée et plus les valeurs de P_{crit} relative augmentent. Les grimpeurs ont donc une P_{crit} relative plus importante car leur capacité à maintenir une puissance élevée durant une période prolongée est supérieure aux autres types de cyclistes. De plus la P_{crit} est étroitement liée à la $P_{méca}$ SV2 ce qui prouve que la P_{crit} semble être un bon indicateur du potentiel aérobie des sujets.

En revanche, les coureurs ayant une P_{crit} faible ne disposent pas forcément des réserves anaérobies les plus élevées. La sprinteuse bénéficie néanmoins des réserves anaérobies les plus élevées du groupe. Enfin, le manque de sujet n'a pas permis de vérifier statistiquement si les valeurs de P_{crit} et W' étaient similaires malgré des profils de performances différents.

Les futures investigations devraient se faire auprès d'un groupe plus conséquent et homogène. Il serait intéressant de valider cette notion de P_{crit} sur le terrain en effectuant des tests de T_{lim} en montée à une $P_{méca}$ cible qui vérifient si la P_{crit} permet de donner un temps similaire d'épuisement local donné par la relation W_{lim}/T_{lim} .

Bibliographie:

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

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

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.* Eur J Sport Sci, 14(3), 217-223

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

Chidnok, W., Dimenna, F. J., Bailey, S. J., Vanhatalo, A., Morton, R. H., Wilkerson, D. P., & Jones, A. M. (2012) . *Exercise tolerance in intermittent cycling: application of the critical power concept.* Med Sci Sports Exerc, 44(5), 966-976.

Di Prampero, P.E. . (1999) .*The concept of critical velocity: a brief analysis.* European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology 80,162-164.

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.* J ApplPhysiol (1985), 108(4), 866-874.

Fitts, R. H. (1994) . *Cellular mechanisms of muscle fatigue.* PhysiolRev, 74(1), 49-94.

Grappe, F. (2009) . *Cyclisme et optimisation de la performance: Science et méthodologie de l'entraînement.* Bruxelles: de Boeck Université.

Grappe, F. (2012) . *Puissance et performance en cyclisme.* Bruxelles: de Boeck Université.

Henry, F. M., & Farmer, D. S. (1949) . *Condition ratings and endurance measures.* Research Quarterly. American Association for Health, Physical Education and Recreation, 20(2), 126-133.

Hill, A. (1927) . *Muscular movement in man: the factors governing speed & recovery from fatigue.* McGraw-Hill.

- Hill, D. W.** (1993) . *The critical power concept*. A review. *Sports Med*, 16(4), 237-254.
- Jones, A. M., Vanhatalo, A., Burnley, M., Morton, R. H., & Poole, D. C.** (2009) . *Critical power: implications for determination of VO_{2max} and exercise tolerance*. *Med Sci Sports Exerc*, 42(10), 1876-1890.
- Karsten B., Jobson S. A., Hopker J., Passfield L., & Beedie C.** (2014) . *The 3-min test does not provide a valid measure of critical power using the SRM isokinetic mode*. *Int J Sports Med*, 35(4), 304-309.
- Karsten B., Jobson S. A., Hopker J., Stevens L. and Beedie C.** . (2015) . *Validity and reliability of critical power field testing*. *Eur J Appl Physiol* 115(1): 197- 204.
- Kennelly, A. E.** (1906) . *An approximate law of fatigue in the speeds of racing animals*. Paper presented at the Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences.
- Le Chevalier JM, Vandewalle H, Thepaut-Mathieu C, Pujol M, Le Natur B, Stein JF.** (2000) . *Critical power of knee extension exercises does not depend upon maximal strength*. *Eur J Appl Physiol*, 81(6): 513-6,.
- Macfarlane DJ, Wong P.** (2012) . *Validity, reliability and stability of the portable Cortex Metamax 3B gas analysis system*. *Eur J Appl Physiol*. 112(7):2539-2547.
- Miura, A., Kino, F., Kajitani, S., Sato, H., & Fukuba, Y.** (1999) . *The effect of oral creatine supplementation on the curvature constant parameter of the power-duration curve for cycle ergometry in humans*. *Jpn J Physiol*, 49(2), 169-174.
- 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.
- Péronnet F, Thibault G** (1984) . *Consommation maximale d'oxygène, endurance et performance en course à pied*. *Macolin*, 7: 15-8.
- Pinot, J., & Grappe, F.** (2011) . *The record power profile to assess performance in elite cyclists*. *International Journal of Sports Medicine*, 32(11), 839-844.
- Pinot, J., & Grappe, F.** (2011) . *Indice d'endurance et profil de performance en cyclisme : étude préliminaire*.

- 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.
- Scherrer, J., Samson, M., & Paleologue, A.** (1954) . *Etude du travail musculaire et de la fatigue: données ergométriques obtenues chez l'Homme.* *J.Physiol. (Paris)*, 46, 887-916.
- Scherrer, J., & Monod, H.** (1960) . *Le travail musculaire local et la fatigue chez l'Homme.* *J Physiol (Paris)*, 52, 419-501.
- Skiba, P. F., D. C. Clarke, A. Vanhatalo, and A. M. Jones.** (2014a) . *Validation of a novel intermittent W0 model for cycling using field data.* *Int. J.Sports Physiol. Perform.*9:900–904.
- Skiba, P. F., W. Chidnok, A. Vanhatalo, and A. M. Jones.** (2012) . *Modeling the expenditure and reconstitution of work capacity above critical power.* *Med. Sci. Sports Exerc.*44:1526–1532.
- Vanhatalo, A., Doust, J. H., & Burnley, M.** (2007) . *Determination of critical power using a 3-min all-out cycling test.* *Med Sci Sports Exerc*, 39(3), 548-555
- Vanhatalo, A., Doust, J. H., & Burnley, M.** (2008a) . *A 3-min all-out cycling test is sensitive to a change in critical power.* *Med Sci Sports Exerc*, 40(9), 1693-1699.
- Vanhatalo, A., Doust, J. H., & Burnley, M.** (2008b) .*Robustness of a 3 min all-out cycling test to manipulations of power profile and cadence in humans.* *ExpPhysiol*, 93(3), 383-390.
- 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.* *ExpPhysiol*, 95(4), 528-540.
- Vanhatalo, A., & Jones, A. M.** (2009) . *Influence of prior sprint exercise on the parameters of the 'all-out critical power test' in men.* *ExpPhysiol*, 94(2), 255-263.
- Vanhatalo, A., Jones, A. M., & Burnley, M.** (2011) . *Application of critical power in sport.* *Int J Sports Physiol Perform*, 6(1), 128-136
- Vogler AJ, Rice AJ, Gore CJ.** (2010) . *Validity and reliability of the Cortex MetaMax3B portable metabolic system.* *J Sports Sci.* 2010;28(7):733-742

Wasserman, K., Stringer, W.W., Casaburi, R., Koike, A., & Cooper, C.B.
(1994). *Determination of the anaerobic threshold by gas exchange: biochemical considerations, methodology and physiological effects.* Z Kardiol 83 Suppl 3: 1-12.