

UNIVERSITE DE FRANCHE-COMTE

Ecole Doctorale Environnement - Santé

THESE

en vue de l'obtention du titre de

DOCTEUR EN SCIENCES DU SPORT

**ETUDE DE LA PUISSANCE MECANIQUE COMME
VARIABLE D'AMELIORATION DE LA PERFORMANCE
EN CYCLISME A TRAVERS L'INTERFACE
HOMME – MACHINE
*Tome 1 – Partie publique***

Présentée et soutenue publiquement à Besançon le 5 décembre 2014

Par **Julien PINOT**

Membres du Jury :

- Mf. Grégoire MILLET, Professeur Université de Lausanne (Rapporteur)
Mf. Robin CANDAU, Professeur Université de Montpellier (Rapporteur)
Mf. Guillaume POLIDORI, Professeur Université de Reims (Examineur)
Mf. Frédéric GRAPPE, Maître de Conférences HDR Université de Franche Comté
(Directeur)
Mf. David LE BOURDIEC, Ingénieur Arts et Métiers, responsable scientifique de l'équipe FDJ
(Examineur)
Mf. Xavier GERGAUD, Ingénieur en aérodynamique, Aero Concept Engineering
(Examineur)

« Ce n'est pas la critique qui est digne d'estime, ni celui qui montre comment l'homme fort a trébuché ou comment l'homme d'action aurait pu mieux faire. Tout le mérite appartient à celui qui descend vraiment dans l'arène, dont le visage est couvert de sueur, qui se bat vaillamment, qui se trompe, qui échoue encore et encore, mais qui fait son maximum pour progresser, qui au mieux connaîtra in fine le triomphe d'une grande réalisation et qui, s'il échoue après avoir tout osé, saura que sa place n'a jamais été parmi les âmes froides et timorées qui ne connaissent ni la victoire ni l'échec. » de T. Roosevelt, 1910 (K.B.)

REMERCIEMENTS

Je souhaite comparer la réalisation de l'ensemble du travail de cette thèse à la période d'entraînement d'un athlète pour une échéance olympique. Tout au long de ces quatre années de préparation en vue de l'objectif de la soutenance, j'ai pu bénéficier de l'accompagnement et de l'aide de nombreuses personnes que je souhaite sincèrement remercier à présent.

Mes premiers remerciements vont à destination de mon coach Fred GRAPPE. Depuis le jour où ma véritable carrière a pris ce tournant, tu as été présent pour me guider et m'accompagner vers le plus haut niveau. Je sais la chance que j'ai de pouvoir profiter de ton expertise, de ta rigueur scientifique, de ta patience (que j'ai parfois dû mettre à rude épreuve) et de ta disponibilité puisque depuis quatre ans tu es probablement la personne avec laquelle j'ai passé le plus de temps ! Fred merci pour tout et surtout pour ta confiance. Notre passion commune de la performance devrait nous amener encore vers de futurs projets passionnants et de belles réussites...

Mes remerciements au Pr. Gilles FERREOL pour m'avoir accueilli au sein de l'équipe d'accueil C3S, ainsi qu'à l'ensemble du personnel de ce laboratoire.

J'adresse ma reconnaissance et un remerciement particulier aux arbitres, membres du jury, les Pr. Grégoire MILLET, Robin CANDAU et Guillaume POLIDORI ainsi que Xavier GERGAUD, d'avoir accepté d'évaluer ce travail. Leur présence en ce jour si particulier est pour moi un grand honneur.

Ce fut un rêve étant enfant d'accéder à ce niveau et de faire partie de cette équipe, je tiens à remercier chaleureusement l'équipe FDJ pour leur confiance. Je pense fortement à l'ensemble du staff qui m'a accompagné et mis dans les meilleures dispositions pour cette échéance. Marc MADIOT, David LE BOURDIEC, Yvon, Martial, Thierry, Franck, Fred, Jacques, Arnaud, Guillaume, Katia, Marina ainsi que le reste du staff technique : MERCI. Ensemble, nous allons continuer de viser très haut...

J'associe également à ces remerciements l'ensemble des partenaires techniques de l'équipe avec lesquels des collaborations fructueuses ont pu être menées, notamment particulièrement Rémi GRIBAUDO de la société Lapierre.

Parce que l'on ne peut pas réussir seul, je tiens à remercier mes équipiers, je veux dire mes collègues que j'ai côtoyé à l'UPFR des Sports : Nico, Anthony, Alexandre, Rémi, Thibaut, Kevin, Flavien, Théo et Claire.

J'ai également une pensée particulière pour l'ensemble des formateurs de mon cursus universitaire pour leurs conseils et le partage de leurs connaissances : les Pr. Jean Denis ROUILLON, Nicolas TORDI et Alain GROSLAMBERT, les Dr. Fabienne MOUGIN-GUILLAUME, Laurent MOUROT et Gilles RAVIER.

Puisqu'il est nécessaire d'avoir des modèles pour se construire, vous avez été une source d'inspiration et m'avez transmis votre passion de l'entraînement à travers les valeurs humaines que vous véhiculez. Jacques DECRION, Vincent VILLERIUS et Mathieu NADAL, j'ai une pensée toute particulière envers vous en ce jour d'objectif majeur.

Je n'oublie pas mon club formateur, le Club Cycliste d'Etupes, qui m'a énormément appris et avec lequel j'ai vécu de magnifiques moments. Jérôme GANNAT, Robert ORIOLI, Jean Pierre, Samuel ainsi que l'ensemble du staff, merci d'avoir cru en moi et de m'avoir permis de trouver ma vocation.

L'ensemble de ce travail n'aurait d'intérêt s'il n'avait pour objectif de participer directement à l'optimisation de la performance des cyclistes avec lesquels j'ai travaillé au cours de ces quatre années. Je tiens à vivement remercier l'ensemble des cyclistes de l'équipe FDJ ainsi que tous ceux avec lesquels j'ai collaboré à un moment ou à un autre. Je ne vous serai jamais assez reconnaissant de tout ce que vous m'avez permis d'apprendre pour en arriver là. Vous m'avez aussi apporté bon nombre d'émotions, chose pour laquelle selon moi le métier d'entraîneur trouve toute son énergie.

Il me semble incontournable de remercier chaleureusement mes amis Arnaud et Romain sur lesquels j'ai toujours pu compter dans les bons et les mauvais moments. Arnaud, tu nous a montré la voie du succès ; Romain, tu n'as plus qu'à marcher dans nos pas ! Vous aussi m'avez encouragé et permis d'en arriver là aujourd'hui. Durant ces quatre années de préparation, nos escapades et moments de détente ont été essentiels pour tenir le cap. De collègues de classes, nous sommes devenus inséparables en prouvant bien que « les vrais amis acceptent qui tu es, mais t'aident aussi à devenir ce que tu dois être ».

J'ai également une pensée toute particulière pour Khoraly qui a contribué à faire de moi l'homme que je suis aujourd'hui, tu resteras essentielle à ma vie et retiens que « l'amitié qui succède à une passion est le seul sentiment qui dure ».

Egalement, je pense à Elisa qui m'a beaucoup apporté au cours de cette dernière année surchargée.

Enfin mais surtout je souhaite remercier du fond du cœur ma famille. Merci infiniment à mes parents pour votre soutien éternel, votre générosité et votre amour. Vous m'avez toujours mis dans les meilleures conditions pour réussir en m'ayant inculqué le sens du travail. La réussite de cet objectif est aussi la vôtre. Merci à Thibaut, mon frère complice et mon sujet d'étude préféré, à Marine, ma petite sœur adorée, comme un grand frère je t'ai montré la voie à suivre ! J'ai aussi une profonde pensée pour mes grands-parents et arrière-grands-parents qui m'ont éduqué et enseigné les vraies valeurs de la vie. J'espère qu'aujourd'hui vous tous, êtes fier de l'homme que je suis devenu...

Résumé

Ce travail de thèse s'est déroulé dans le cadre d'une convention CIFRE entre mon laboratoire de rattachement C3S (EA4660) et le département Recherche et Développement (R&D) de l'équipe cycliste professionnelle FDJ. Les différentes études que nous avons conduites se sont articulées autour de l'amélioration de la performance sportive chez le cycliste à travers une variable centrale qui est la puissance mécanique qu'il développe lors de la locomotion ($P_{\text{méca}}$) selon deux axes principaux : 1) l'évaluation et le suivi du potentiel physique avec pour but l'amélioration du processus d'entraînement et 2) l'optimisation de l'interface homme – machine à partir de l'analyse du matériel et des équipements utilisés par les cyclistes dans l'équipe FDJ.

Concernant le premier axe de recherche, cinq études ont été menées. La première a présenté la méthodologie de détermination de la relation puissance – temps propre à chaque cycliste, défini comme le Profil de Puissance Record (PPR). Elle a été réalisée à partir d'un suivi des $P_{\text{méca}}$ records mesurées à l'entraînement et en compétition. Les résultats ont montré que le PPR représentait un véritable outil de quantification du niveau de performance du cycliste reflétant l'expression de son profil physiologique avec l'ensemble de ses qualités physiques. Dans la continuité, une étude de cas intégrant des données de $P_{\text{méca}}$ sur plusieurs années a montré que le PPR associé à la quantification de la charge d'entraînement permettait d'analyser l'évolution dans le temps des différentes aptitudes physiques du cycliste en fonction du suivi de l'entraînement. Une troisième étude a présenté une méthode permettant d'évaluer la puissance maximale aérobie (PMA) et la capacité d'endurance aérobie à partir du PPR. La relation $P_{\text{méca}}$ record – logarithme du temps exprimant le potentiel aérobie du cycliste, autorisait la détermination de la PMA, du temps limite à PMA et d'un indice de la capacité d'endurance aérobie du cycliste. Enfin, deux études complémentaires ont été menées afin de mieux comprendre les mécanismes sous-jacents lors de la production de la $P_{\text{méca}}$ par un cycliste dans différentes conditions d'exercice et de terrain. Avec un profil de terrain différent, nous avons montré que lors d'un effort maximal sur 4 minutes la $P_{\text{méca}}$ était supérieure en montée comparé au plat. Aussi, l'analyse de la technique en position de danseuse a montré que cette position était génératrice d'une importante quantité d'énergie au niveau du centre de masse déterminant d'importantes différences interindividuelles entre les cyclistes. Une technique en danseuse efficace serait associée à des transferts supérieurs entre l'énergie potentielle et l'énergie cinétique produite au niveau du centre de masse.

Les projets de R&D conduits sur le matériel et les équipements en relation avec les partenaires techniques de l'équipe FDJ ont permis d'optimiser l'interface homme – machine sur la dimension aérodynamique. Les études expérimentales que nous avons mené ont été centrées sur la discipline du contre la montre où les résistances dues à la traînée aérodynamique constituent le paramètre principal d'optimisation. Le développement du cadre, du kit bidon, de la combinaison et du casque en CLM ont permis d'apporter des gains aérodynamiques significatifs. Le casque aérodynamique de course en ligne a également fait l'œuvre d'un travail d'optimisation, notamment au bénéfice des sprinteurs. Différentes méthodologies ont été utilisées pour évaluer la traînée aérodynamique du système cycliste – vélo : mesures en soufflerie, tests en conditions réelles de locomotion sur vélodrome et modélisation numérique de la mécanique des fluides (CFD). Lors du processus de développement du cadre de CLM nous avons observé que les résultats ne convergeaient pas systématiquement dans le même sens en fonction de la technique utilisée. En effet, chaque méthodologie possède ses propres avantages et limites qui peuvent entraîner des biais dans les mesures et par conséquent dans l'analyse des résultats. Nous suggérons que l'utilisation de la complémentarité entre ces trois méthodes est une alternative scientifique valide pour la réalisation d'un projet R&D portant sur le développement d'un composant matériel ou d'un équipement. Manifestement, il semble que certaines méthodologies soient plus appropriées que d'autres en fonction du matériel ou de l'équipement testé selon l'étape du processus de développement dans lequel on se situe (comparaison, recherche, développement, validation). Ainsi, la CFD serait la méthode la plus pertinente dans le cadre de la recherche et du développement de nouveau composant matériel (cadre, composants périphériques...). La mesure en soufflerie avec l'utilisation d'un mannequin apparaît plus appropriée dans le cadre d'études comparatives notamment d'équipements (casque, combinaison...). Enfin, les tests sur vélodrome réalisés en conditions réelles de locomotion avec un cycliste, semblent être la méthode la plus adaptée dans un processus de validation globale de matériel et d'équipement.

Mots-clés : Performance, cyclisme, puissance mécanique, évaluation du potentiel physique, puissance maximal aérobie, endurance aérobie, charge d'entraînement, évaluation de terrain, biomécanique, technique de pédalage, interface homme – machine, traînée aérodynamique, soufflerie, modélisation numérique de la mécanique des fluides.

Abstract

This thesis has been completed as part of a CIFRE agreement between the laboratory C3S (EA4660) and the Research and Development (R&D) department of the FDJ professional cycling team. The various studies that we conducted centred on analysing sport performance optimisation in cyclists through a central variable: the mechanical power output (PO) developed during locomotion. There were two main areas of focus: 1) evaluation and monitoring of physical potential, with the aim of improving the training process, and 2) optimisation of the human-machine interface via analysis of the materials and equipment used by the FDJ team cyclists.

Regarding the first axis of research, five studies were conducted. The first presented the methodology for determining the power-time relationship for each cyclist, defined as the Record Power Profile (RPP). This constituted a follow-up of the record PO which are measured during all trainings and competitions. The results showed that RPP is a viable tool for quantifying the performance level of the cyclist, reflecting the expression of his physiological profile and all its physical qualities. Subsequently, a case study that used several years of PO data showed that when associated with training load quantification, RPP allows to analyse the evolution of the cyclist's different physical abilities over time. A third study presented a method to assess Maximal Aerobic Power (MAP) and aerobic endurance capability using RPP. The relationship record PO—logarithm of time, expressing the aerobic potential of the cyclist, allowed the determination of MAP, the time that MAP can be sustained and an index of the aerobic endurance capacity of the cyclist. Finally, two additional studies were conducted in order to improve understanding of the underlying mechanisms in the production of PO by a cyclist facing different exercise conditions and terrains. With different terrain profiles, we showed that, during different 4-min time trials, PO was significantly higher when riding uphill than on flat ground and on ergometer in laboratory. Furthermore, the analysis of the standing position technique showed that this posture generated a significant amount of energy at the centre of mass, which determined large interindividual differences between cyclists. An efficient standing technique seems to be associated with a higher transfer between potential and kinetic energy at the level of the centre of mass.

The R&D projects that were conducted on materials and equipment, in collaboration with the technical partners of the FDJ team, have allowed the human-machine interface to be optimised on an aerodynamic level. The experiments that we conducted focused on the

individual time trial (TT), where resistance due to aerodynamic drag is the main optimisation parameter. Development of the TT framework, bottle-kit, aerosuit and helmet brought significant aerodynamic gains. The aerodynamic road helmet was also optimised which was of particular benefit to sprinters. Different methodologies were used to evaluate the aerodynamic drag of the system cyclist–bike: wind tunnel measurements, tests under real locomotion in the velodrome, and computational fluid dynamics (CFD). During the development process of the TT framework, we observed that the results did not always follow the same trend, which was dependent on the technique being used. Indeed, each methodology has its own advantages and limitations that may lead to biases in measurement and, therefore, in the analysis. We suggest that the complementary use of these three methods is a valid scientific alternative for conducting R&D projects on materials. Clearly, certain methodologies are more appropriate than others, depending on the material or equipment being tested and according to the stage of the development process (comparison, research, development, validation). Thus, CFD would be the most appropriate method for the research and development of new material (framework, peripheral components, etc.), wind tunnel measurement with the use of a mannequin seems to be most appropriate for comparative studies of equipment (helmet, aerosuit, etc.), and the use of the velodrome, which allows tests to be performed in real conditions of locomotion with a cyclist, appears to be the most suitable method in the global process of validation of materials or equipment.

Keywords : Performance, Cycling, power output, physical potential, maximal aerobic power, aerobic endurance, training load, field testing, biomechanics, pedalling technique, human – machine interface, aerodynamics, wind tunnel, computational fluid dynamics.

TABLE DES MATIERES

| | |
|--|----|
| Résumé | 9 |
| Abstract | 11 |
| TABLE DES MATIERES | 13 |
| LISTE DES PUBLICATIONS..... | 17 |
| LISTE DES ABREVIATIONS | 21 |
| TABLE DES FIGURES | 23 |
| LISTE DES TABLEAUX..... | 27 |
| INTRODUCTION GENERALE..... | 28 |
| Contexte | 29 |
| Introduction | 31 |
| Structuration de la thèse | 37 |
| PARTIE 1 : EVALUATION DU POTENTIEL PHYSIQUE..... | 38 |
| CHAPITRE 1 : Etude bibliographique..... | 39 |
| 1. Etude de la relation intensité – temps..... | 39 |
| 1.1. Modèles empiriques | 39 |
| 1.2. Modèles bioénergétiques..... | 41 |
| 1.2.1. Concept de la puissance critique | 42 |
| 1.2.2. Limites du modèle hyperbolique de la P_{crit} | 47 |
| 1.2.3. Autres modèles bioénergétiques..... | 48 |
| 1.2.4. Evaluation de l’endurance | 53 |
| 2. Applications de la relation intensité – temps dans le cyclisme | 60 |
| 2.1. Relation intensité – temps en cyclisme | 60 |
| 2.2. Mesure de la $P_{méca}$ en cyclisme | 68 |
| 3. Synthèse et objectifs de travail..... | 73 |
| CHAPITRE 2 : Etude I : Détermination du Profil de Puissance Record | 77 |

| | |
|---|-----|
| Résumé détaillé | 77 |
| CHAPITRE 3 : Suivi longitudinal du PPR | 87 |
| Résumé détaillé | 87 |
| CHAPITRE 4 : Détermination d'une méthode d'évaluation de la PMA et de l'endurance aérobie en cyclisme sur le terrain | 101 |
| Résumé détaillé | 101 |
| CHAPITRE 5 : Influence des conditions et de la nature du terrain sur la $P_{méca}$ produite lors d'un test maximal sur 4 minutes | 113 |
| Résumé détaillé | 113 |
| CHAPITRE 6 : Etude de la technique en danseuse en rapport à la $P_{méca}$ développée au niveau du centre de masse et celle utile à l'avancement | 127 |
| Résumé détaillé | 127 |
| DISCUSSION | 145 |
| CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES | 157 |
| BIBLIOGRAPHIE | 161 |
| ANNEXES | 173 |
| 1. Co-auteur d'un article publié dans la revue internationale Journal of Science and Cycling. | 175 |
| 2. Lettre aux éditeurs publiée dans la revue internationale International Journal of Sport Medicine | 183 |
| 3. Communication orale au 35 ^{ème} congrès de la Société de Biomécanique au Mans en 2010, ayant fait l'œuvre d'un article dans le supplément de la revue internationale Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering | 184 |
| 4. Communication orale au 36 ^{ème} congrès de la Société de Biomécanique à Besançon en 2011, ayant fait l'œuvre d'un article dans le supplément de la revue internationale Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering | 186 |
| 5. Communication orale au 14 ^{ème} congrès de l'ACAPS à Rennes en 2011 | 188 |
| 6. Communication orale au 15 ^{ème} congrès de l'ACAPS à Grenoble en 2013 | 190 |

7. Communication orale au 2^{ème} World Congress of Cycling Science à Leeds en 2014, ayant fait l'œuvre d'un article dans le supplément de la revue internationale Journal of Science and Cycling 192

LISTE DES PUBLICATIONS

Cette thèse a fait l'objet de 3 articles publiés, ainsi que 2 articles actuellement en révision, dans des revues scientifiques internationales à comités de lecture.

- ✓ **Pinot J**, Grappe F. The record power profile to assess performance in elite cyclists. *International Journal Sports Medicine*, 32: 839-844, 2011.
- ✓ **Pinot J**, Grappe F. Determination of maximal aerobic power on the field in cycling. *Journal Science Cycling*, 3(1): 26-31, 2014.
- ✓ **Pinot J**, Grappe F. A six-year monitoring case study of a top-10 cycling grand tour finisher. *Journal Sport Sciences*, accepté le 20 septembre 2014
- ✓ **Pinot J**, Candau R, Rinaldi K, Grappe F. World-class climber cyclist has a more efficient standing technique in uphill cycling. *Medicine Science Sport Exercise*, en cours de révision
- ✓ Bouillod A, **Pinot J**, Soenen F, Ouvrard T, Grappe F. The determination of the maximal aerobic power from a 4-min time-trial test is dependent of the pedalling condition. *International Journal of Sport Medicine*, en cours de révision

Durant ces trois années de thèse, la réalisation de travaux portant sur des thématiques proches a également conduit à la rédaction d'un article publié dans une revue scientifique internationale à comité de lecture.

- ✓ Menetrier A, **Pinot J**, Mourot L, Grappe F, Bouhaddi M, Regnard J, Tordi N. Effects of Recoveries by Contrasted Water Immersion and Compression Sleeves on Subsequent 5-min Cycling Performance, *Journal Science Cycling*, 2(2): 49-56, 2013.

Une lettre aux éditeurs a également été adressée dans une revue scientifique internationale à comité de lecture.

- ✓ **Pinot J**, Grappe F. Letter to the Editors. *International Journal Sport Medicine*, 33: 416, 2012

Les résultats de cette thèse ont aussi été diffusés au cours de congrès scientifiques nationaux et internationaux.

Communications orales :

- ✓ **Pinot J**, Grappe F. The « Power Profile » to determine the physical capacities of the cyclist. 35^{ème} congrès annuel de la Société de Biomécanique. Le Mans, 25 -27 août 2010
- ✓ **Pinot J**, Grappe F. Evaluation du potentiel physique du cycliste à travers le Profil de Puissance Record (PPR). La préparation physique : du laboratoire au terrain. 2^{ème} journées Gilles Cometti, Faculté des Sports de Dijon / Centre d'Expertise de la Performance, 19-20 novembre 2010
- ✓ **Pinot J**, Grappe F. The Peronnet – Thibault mathematical model applied to the Record Power Profile in cycling. 36^{ème} congrès annuel de la Société de Biomécanique. Besançon, 31 août – 2 septembre 2011
- ✓ **Pinot J**, Grappe F. Indice d'endurance et profil de performance en cyclisme : étude préliminaire. 14^{ème} Congrès Internationale de l'ACAPS, Rennes, 24 au 26 octobre 2011
- ✓ **Pinot J**. Le corps du cycliste de haut niveau au centre de la mesure et de l'optimisation de la performance. Séminaire « Jeunes chercheurs » C3S, Besançon, 5 avril 2012.
- ✓ **Pinot J**, Grappe F. Détermination de la PMA à partir du profil de puissance record en cyclisme. 3^{ème} journées Gilles Cometti, Faculté des Sports de Dijon / Centre d'Expertise de la Performance, 12-13 avril 2013
- ✓ **Pinot J**. L'image au service de l'amélioration de la performance en cyclisme à travers l'étude aérodynamique de l'ensemble homme – bicyclette. Séminaire « Jeunes chercheurs » C3S, Besançon, 30 avril 2013.
- ✓ **Pinot J**, Rinaldi K, Grappe F. Analyse de la puissance mécanique au niveau du bassin en position danseuse en cyclisme. 15^{ème} Congrès International de l'ACAPS, Grenoble, 29 au 31 octobre 2013
- ✓ **Pinot J**, Bouzigon R. Article scientifique en sciences du sport : technicité et vulgarisation en fonction du public destinataire. Séminaire « Jeunes chercheurs » C3S, Besançon, 20 février 2014.

Communications affichées :

- ✓ **Pinot J**, Grappe F. Comparison of power output demands for a top-10 ranking between Tour de France and Vuelta a Espana. *World Congress of Cycling Science*, University of Kent, Leeds, 2014.

4 résumés de communications orales ont fait l'œuvre de publication dans des revues scientifiques internationales à comités de lecture.

- ✓ **Pinot J**, Grappe F. The « Power profile » for determining the physical capacities of a cyclist. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 13 (S1): 103-104, 2010.
- ✓ **Pinot J**, Grappe F. The Peronnet – Thibault mathematical model applied to the Record Power Profile in cycling. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 14 (S1): 219-220, 2011.
- ✓ **Pinot J**, Grappe F. Comparison of power output demands for a top-10 ranking between Tour de France and Vuelta a España. *Journal of Science and Cycling*. 3 (2): 43, 2014.
- ✓ Bouillod A, **Pinot J**, Valade A, Cassirame J, Soto-Romero G, Grappe F. Gross efficiency is improved in standing position with an increase of the power output. *Journal of Science and Cycling*. 3 (2): 6, 2014.

2 actes de séminaire ont fait l'œuvre de chapitre d'ouvrage.

- ✓ **Pinot J**. Le corps du cycliste de haut niveau au centre de la mesure et de l'optimisation de la performance. in Tuailon-Démésy A et Ferréol G (sous la coord. de), *La Place du corps dans la recherche, Actes du séminaire « Jeunes chercheurs » C3S*, 29-36, 2012.
- ✓ **Pinot J**. L'image au service de l'amélioration de la performance en cyclisme à travers l'étude aérodynamique de l'ensemble homme – bicyclette. in Tuailon-Démésy A et Ferréol G (sous la coord. de), *L'image et ses dérivés dans la recherche, Actes du séminaire « Jeunes chercheurs » C3S*, 29-36, 2013.
- ✓ **Pinot J**, Bouzigon R. Article scientifique en sciences du sport : technicité et vulgarisation en fonction du public destinataire. in Tuailon-Démésy A et Ferréol G (sous la coord. de), *L'écrit : comment rendre compte d'une recherche ? Actes du séminaire « Jeunes chercheurs » C3S*, 2014.

LISTE DES ABREVIATIONS

- ✓ ACE, Aéro Concept Engineering
- ✓ ATP, adénosine triphosphate
- ✓ ANRT, Association Nationale Recherche Technologie
- ✓ CAO, conception assistée par ordinateur
- ✓ CFD, computational fluid dynamics
- ✓ CLM, contre-la-montre
- ✓ CM, centre de masse
- ✓ C_r , coefficient de roulement (sans dimension)
- ✓ C_x , coefficient de pénétration dans l'air (sans dimension)
- ✓ E, énergie (J)
- ✓ EM, efficacité mécanique
- ✓ IEA, indice d'endurance aérobie (sans dimension)
- ✓ \log_t , logarithme du temps
- ✓ m, masse (kg)
- ✓ P, poids (N)
- ✓ P_{crit} , puissance critique (W)
- ✓ PMA, puissance maximale aérobie (W)
- ✓ $P_{méca}$, puissance mécanique (W)
- ✓ $P_{méca-4min}$, puissance mécanique moyenne du test 4 min (W)
- ✓ $P_{méca-cin}$, puissance mécanique cinétique du centre de masse (W)
- ✓ $P_{méca-CM}$, puissance mécanique du centre de masse (W)
- ✓ $P_{méca-cin}$, puissance mécanique potentielle du centre de masse (W)
- ✓ PPR, profil de puissance record
- ✓ R_a , traînée aérodynamique (N)
- ✓ RPE, rated of perceived exertion (sans dimension)
- ✓ R_r , résistance au roulement (N)
- ✓ R_s , résistance mesurée en soufflerie (N)
- ✓ R_T , résistances totales à l'avancement (N)
- ✓ R&D, recherche et développement
- ✓ S, surface frontale (m^2)
- ✓ T, temps (h, min, sec)
- ✓ TE, transfert d'énergie

- ✓ T_{PMA} , temps de maintien de la PMA (min)
- ✓ UCI, Union Cycliste Internationale
- ✓ V_a , vitesse d'avancement ($m \cdot sec^{-1}$)
- ✓ V_d , vitesse de déplacement ($m \cdot sec^{-1}$)
- ✓ VMA, vitesse maximale aérobie (km/h)
- ✓ $\dot{V}O_2$: consommation d'oxygène ($mL \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$)
- ✓ $\dot{V}O_{2max}$: consommation maximale d'oxygène ($mL \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$)
- ✓ V_s , vitesse du vent soufflerie ($m \cdot sec^{-1}$)
- ✓ V_v , vitesse du vent extérieur ($m \cdot sec^{-1}$)
- ✓ W , quantité de travail mécanique (J)
- ✓ W' , capacité de travail anaérobie dans le concept de puissance critique (J)
- ✓ W_{autre} , autre travail mécanique (J)
- ✓ W_{cin} , travail mécanique cinétique (J)
- ✓ W_{ext} , travail mécanique externe (J)
- ✓ $W_{ext-capteur}$, travail mécanique externe mesuré par les capteurs de puissance (J)
- ✓ W_{int} , travail mécanique interne (J)
- ✓ W_p , travail mécanique lié à la résistance contre la gravité (J)
- ✓ W_{pot} , travail mécanique potential (J)
- ✓ $W_{propulsion}$, travail mécanique lié à l'appareil propulsif (J)
- ✓ W_{Ra} , travail mécanique lié à la résistance contre l'air (J)
- ✓ W_{Rr} , travail mécanique lié à la résistance au roulement (J)
- ✓ W_{tot} , travail mécanique total (J)
- ✓ $W_{vélo}$, travail mécanique utile à l'avancement du système homme – machine (J)
- ✓ $\% VO_{2max}$, pourcentage de la consommation maximale d'oxygène (%)
- ✓ $\% PMA$, pourcentage de la puissance maximale aérobie (%)
- ✓ $\% VMA$, pourcentage de la vitesse maximale aérobie (%)

TABLE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| Figure 1 Cascade de la dépense énergétique totale aux différentes formes de travail mécanique généré (adapté de Minetti, 2011)..... | 33 |
| Figure 2 Evolution des records du Monde en course à pied de 1913 à 1985, du 100 m au marathon (temps de chaque épreuve rapporté en vitesse moyenne) (Frederick, 1986) | 40 |
| Figure 3 Comparaison de 3 modèles mathématiques avec la puissance en abscisse à partir d'un cas concret (Grosse – Lordeman et Muller (trait plein), Bigland – Ritchie et Woods (grands pointillés) et Hopkins et coll (petits pointillés)) (Morton et Hodgson, 1996)..... | 41 |
| Figure 4 Relation vitesse – temps en course à pied et en natation (Hill, 1927) (adapté par Billat, 2003)..... | 42 |
| Figure 5 En haut : illustration de la relation $P_{méca}$ – temps. Les chiffres 1 à 4 représentent les $P_{méca}$ atteintes en fonction des durées d'épuisement pour des tests indépendants. En bas : détermination de P_{crit} et W' à partir de la relation $P_{méca} - 1/temps$ (adapté de Jones A. M. et al., 2009)..... | 44 |
| Figure 6 Evolution de la $P_{méca}$ moyenne de 14 sujets sur un test « all-out » 3 min. La zone grisée correspond à la moyenne des 30 dernières secondes à partir desquelles la P_{crit} est déterminée (Francis J. T. et al., 2010)..... | 46 |
| Figure 7 Diminution de la $P_{méca}$ maximale expliquée par rapport à la part de production énergétiques des différents métabolismes (adapté de la courbe d'Howald) | 50 |
| Figure 8 le modèle hydraulique à 3 composantes de Morton (adapté de Sundström et al. (2014))..... | 51 |
| Figure 9 Comparaison des différentes modélisations d'évolution de la fraction de VO_{2max} soutenue selon le temps d'exercice (d'après les données de Léger et al. (1986), de Montmayeur et Villaret (1990), de Saltin (1973) et de di Prampero (1986)) | 56 |
| Figure 10 Illustration graphique et mathématique de l'évaluation de l'indice d'endurance de deux athlètes (Durant et Dupont) à partir de plusieurs performances réalisées en course à pied dont les $\%VO_{2max}$ équivalents ont été estimés. Dans cet exemple, Durant a une capacité d'endurance plus élevée (IE : -5,7) que Dupont (IE : -7,9) (adapté de Peronnet et Thibault, 1984)..... | 57 |

| | |
|---|----|
| Figure 11 Décroissance de la durée limite maintenue en fonction du % v_{MA} utilisée (Cazorla, 2001)..... | 57 |
| Figure 12 Nomogramme de Mercier et al. (1984). Exemple de calcul de l'IE de Dupont (bleu) et Durant (vert) à partir de performances réalisées en course à pied (IE = indice A – indice B). Durant a une capacité d'endurance plus élevée (IE : 169-89=80) que Dupont (158-101=57). Exemple d'après les mêmes données que dans la figure 11 (Peronnet et Thibault, 1984). | 58 |
| Figure 13 Modélisation de la relation temps – % P_{max} obtenue à partir d'essais en laboratoire avec des cyclistes (Harman et al., 1987) | 60 |
| Figure 14 Relation $P_{méca}$ - temps adaptée à partir du tableau de Coggan (pour des athlètes masculins) (Allen et Coggan, 2010)..... | 63 |
| Figure 15 Relations $P_{méca}$ – temps pour des critères (CRIT), étapes plates (FLAT) et étapes montagneuses (HILLY) d'une course à étapes (Ebert et al., 2006) | 64 |
| Figure 16 Relation $P_{méca}$ – temps (en rouge foncé) d'un cycliste lors du Tour d'Italie par rapport aux niveaux définis par Allen et Coggan (2010) à partir des records de puissance maximale développés sur cette course à étapes, d'après les données de Vogt et al. (2007).... | 65 |
| Figure 17 Evolution de la courbe $P_{méca}$ - temps d'un cycliste à partir d'un test de tlim (Sassi, mapeisport.it/ivanbasso)..... | 66 |
| Figure 18 Relation $P_{méca}$ - temps de maintien à partir du suivi de 5 cyclistes professionnels (Larrazabal et al., 2006) | 67 |
| Figure 19 Profil de puissance de 5 cyclistes de différents niveaux (Villerius et al., 2007) | 67 |
| Figure 20 Cyclo-ergomètre avec système de réglage de la $P_{méca}$ à partir d'un freinage mécanique par courroie (Monark, modèle 874E)..... | 69 |
| Figure 21 Cyclo-ergomètre avec système de réglage de la $P_{méca}$ à partir d'un freinage électromagnétique (Lode Excalibur) | 69 |
| Figure 22 Système SRM avec le pédalier (contenant les jauges de contraintes) et le compteur, (Powercontrol) récepteur et afficheur des données | 71 |
| Figure 23 Etalonnage par une méthode statique du pédalier SRM | 71 |
| Figure 24 Capteur de puissance Powertap avec le système de mesure à l'intérieur du moyeu | 72 |
| Figure 25 PPR moyen des 17 cyclistes | 78 |
| Figure 26 Evolution de la charge d'entraînement annuel (bleu) et volume total (rouge) | 88 |

| | |
|---|-----|
| Figure 27 Evolution des $P_{\text{méca}}$ records à l'intérieur des 5 zones d'intensité au cours des 6 saisons | 89 |
| Figure 28 Méthodologie de détermination de PMA et T_{PMA} . La ligne continue représente la régression linéaire de la relation $P_{\text{méca}}$ record – \log_t entre 10 min et 4 h (bleu). Les lignes pointillées représentent les extrémités de l'intervalle de confiance équivalentes à 2 écarts-types résiduels à la régression. L'intervalle de confiance est extrapolé autour des $P_{\text{méca}}$ records entre 3 et 7 min (jaune). PMA est la première $P_{\text{méca}}$ record à l'intérieur de l'intervalle de confiance (rouge). Pour ce cycliste : PMA = 6.5 W/kg et T_{PMA} = 4,5 min..... | 103 |
| Figure 29 Relation % PMA – \log_t du même cycliste que dans la figure 28. La pente de cette relation détermine l'indice d'endurance aérobie (-9,3 pour ce cycliste)..... | 103 |
| Figure 30 PPR d'un cycliste avec les différentes zones d'intensités délimitées par les $P_{\text{méca}}$ records correspondantes | 147 |
| Figure 31 Statistiques d'une séance d'entraînement affichées lors de l'import d'un fichier SRM sur la plateforme web utilisée par les cyclistes de l'équipe FDJ | 152 |
| Figure 32 Exemple de fichier de suivi des $P_{\text{méca}}$ records..... | 153 |
| Figure 33 Article du journal L'Equipe du 14 décembre 2012 sur l'intérêt du PPR..... | 155 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|--|----|
| Tableau 1 Tableau de Coggan classifiant le niveau d'un coureur en fonction de la relation $P_{\text{méca}}$ – temps (en rouge : cas du cycliste 1, en vert : cas du cycliste 2) (données non publiées, trainingpeaks.com/articles/cycling/power-profiling.aspx)..... | 62 |
| Tableau 2 Pics de puissance maximales sur différents intervalles de temps d'un groupe de cyclistes lors du Tour de France (Vogt et al., 2007) | 64 |
| Tableau 3 Pics de $P_{\text{méca}}$ maximale sur différents intervalles de temps (15, 30, 60, 120, 180, 240, 300 et 1800 sec) d'un cycliste relevés sur un Tour d'Italie (Vogt et al., 2007) | 65 |

INTRODUCTION GENERALE

Contexte

Avant de présenter l'ensemble des travaux réalisés au cours de ma thèse, il nous semble important de préciser le cadre dans lequel ce doctorat s'est déroulé afin de mieux comprendre la démarche méthodologique que nous avons adoptée. En début d'année 2011, la Française des Jeux (FDJ), la loterie nationale française, reconduisait son partenariat pour une durée de trois ans (2012 – 2014) avec l'équipe cycliste qu'elle sponsorise depuis 1997, alors qu'elle vient d'être reléguée en deuxième division mondiale. Fred Grappe, mon directeur de recherche, étant conseiller technique et scientifique de l'équipe, proposa le projet de création d'un département Recherche et Développement (R&D) au sein de l'équipe afin d'accentuer le travail réalisé en terme d'optimisation de la performance et d'améliorer l'accompagnement des cyclistes vers le plus haut niveau mondial. Ce projet fut dans un premier temps accepté en conseil d'administration avant qu'une demande de CIFRE (Convention Industrielle de Formation par la Recherche) ne soit soumise à l'Association Nationale de la Recherche et de la Technologie (ANRT) afin de créer un poste au sein de ce département R&D. En septembre 2011, le projet est accepté par l'ANRT avant que mon doctorat ne débute au mois de novembre suivant sous la forme d'une convention CIFRE c'est-à-dire dans le cadre d'une collaboration entre la Société de Gestion l'Echappée (qui gère l'équipe cycliste FDJ) et le laboratoire de recherche EA 4660 « Culture – Sport – Santé – Société » (C3S). D'une part, l'entreprise me rémunère avec un contrat de travail portant sur 3 ans, en percevant une aide financière annuelle de l'ANRT, d'autre part, je suis relié à un laboratoire de recherche universitaire, qui est donc le laboratoire C3S, lui-même rattaché à une école doctorale. Il se caractérise par être une équipe d'accueil multidisciplinaire dont les recherches croisent la physiologie, la biomécanique, la sociologie ou encore l'histoire avec un dénominateur commun qui est le sport. Au sein de ce laboratoire, nous appartenons à l'axe 3, qui regroupe les enseignants-chercheurs axant leurs recherches autour du thème « Sport – Santé ».

Le caractère original de ce travail de thèse réside dans le champ d'application spécifique dans lequel il se déroule, une équipe cycliste professionnelle. Ainsi, les activités de recherche menées ont nécessité d'être en lien direct ou étroit avec le terrain afin d'en extraire des applications pratiques profitables aux différents cyclistes de l'équipe. Une des difficultés rencontrées provenait de la complexité de concilier l'approche méthodologique rigoureuse de la recherche scientifique avec les particularités du milieu sportif généralement régi par l'empirisme et les problématiques d'ordre logistiques. A partir de ce constat, nous nous sommes toujours efforcés d'informer et d'intégrer les différentes corporations de l'équipe

(coureurs, staff technique, personnel administratif, mécaniciens, médecins...) dans la réalisation de nos projets et travaux de R&D afin de fédérer l'ensemble de l'équipe derrière un objectif commun : l'optimisation de la performance sportive des coureurs.

Nous montrerons tout au long de ce travail de thèse que la démarche scientifique que nous avons utilisé au cours des trois années de recherche a été originale et singulière et a contribué à faire progresser l'équipe cycliste FDJ dans l'échiquier mondial à travers son modèle de performance sportive. En effet, au début de ce travail, fin 2011, l'équipe accédait de nouveau au World Tour (1^{ère} division mondiale) avant de progresser chaque année dans la hiérarchie mondiale autour de leaders d'avenir avec une approche stratégique plus élaborée et dans un contexte du cyclisme mondial plus sain et favorable. D'un point de vue plus académique, une partie de ce travail a fait l'œuvre de publications dans des revues internationales et de communications dans des congrès, alors qu'une autre partie plus confidentielle a fait l'œuvre de rapports internes à destination du département R&D de l'équipe et à certains partenaires techniques. Enfin, il convient de préciser que suite à l'ensemble des travaux menés au cours de cette convention CIFRE, l'équipe FDJ m'a proposé une prolongation de contrat avant même la soutenance finale de la thèse pour un poste d'entraîneur avec des missions R&D dans la continuité du travail entrepris des dernières années. Le cadre général étant posé, abordons à présent notre démarche méthodologique qui a permis de mener à bien l'ensemble de nos travaux.

Introduction

Le record et la performance semblent caractériser notre société moderne où notre corps est souvent assimilé à une « machine de rendement ». Le sport devenant une activité centrale de notre civilisation, la notion de performance y est omniprésente que ce soit dans le sport-loisir, le sport-santé, l'éducation physique et sportive et bien évidemment dans le sport de compétition. Ce dernier se caractérise par la réalisation de performances physiques et mentales maximales par des athlètes qui essaient d'exploiter le maximum de leur potentiel. Dans certains sports individuels où les performances réalisées en compétition sont reliées au chronomètre ou au décamètre (athlétisme, natation...), il est possible de quantifier les records personnels. Cela permet d'évaluer et de suivre l'évolution de la capacité de performance de l'athlète de manière longitudinale sur toute une carrière. Dans ces sports, il est possible d'établir des comparaisons intra et interindividuelles car les conditions environnementales de mesure de la performance sont en grande partie standardisées (piste d'athlétisme, longueur de bassin, conditions atmosphériques stables ou contrôlées). En revanche, en cyclisme sur route, il n'est pas possible d'établir les mêmes modèles de comparaison pour analyser l'évolution des performances puisque les conditions de pratique en compétition ne sont jamais identiques : stratégie de gestion de la course, types de parcours, revêtement, conditions atmosphériques, matériel utilisé. Ainsi, un cycliste peut être physiquement performant mais sans obtenir de bons résultats en compétition, cette dernière faisant régulièrement appel à des critères technico-tactiques et répondant à des impondérables. Inversement, il peut être performant en compétition mais sans être à 100% de son potentiel physique.

La quantification de la performance en cyclisme représente donc une étape délicate car elle est difficilement quantifiable objectivement. L'idéal pour la quantifier serait une évaluation de la performance à la fois fréquente et reproductible, quelle que soit la période d'entraînement, et proche de l'effort de compétition. Or, dans une discipline comme le cyclisme, les athlètes ne peuvent pas se permettre de réaliser toutes les compétitions au maximum de leur potentiel physique et/ou de faire trop souvent des évaluations de laboratoire ou de terrain à partir de tests qui exigent un engagement physique et mental maximal. Les données recueillies en laboratoire ont l'avantage d'être plus précises, mais ne sont pas forcément représentatives de celles d'un athlète en situation habituelle de compétition.

Pour pallier à ce problème dans les activités de fond, Banister et Hamilton (1985) ont proposé de remplacer l'épreuve de compétition par une épreuve de substitution plus courte chez des coureuses de fond. Millet *et al.* (2002) ont quantifié les performances en compétition sur une

échelle subjective de 0 à 10 points, suivant l'appréciation du triathlète et de son entraîneur. Certaines études ont modélisé la performance en pourcentage du record personnel réalisé avant la période de suivi (en natation) (Mujika *et al.*, 1996 ; Avalos *et al.*, 2003 ; Hellard *et al.*, 2005) ou pendant l'étude (en natation et course à pied) (Wood *et al.*, 2005 ; Hellard *et al.*, 2006) et en pourcentage de la performance moyenne au cours de la période étudiée (en triathlon) (Millet, Candau, *et al.*, 2002). Or, les épreuves de substitution et les modélisations de la quantification de la performance peuvent constituer une source supplémentaire d'imprécision si elles ne sont pas parfaitement fidèles à l'évolution de la performance dans la véritable compétition (Hopkins *et al.*, 1999).

Ainsi, il apparaît qu'aujourd'hui aucune méthode objective n'existe pour quantifier rationnellement le niveau de performance du cycliste en mettant en relation le potentiel physique et les résultats réalisés en compétition. Néanmoins, le cyclisme se trouve être le seul sport où il est possible de mesurer et d'analyser l'effort produit pour se déplacer en routine, sur le terrain, grâce à une variable mécanique objective : la puissance développée ($P_{\text{méca}}$). L'intérêt de mesurer la $P_{\text{méca}}$ d'un cycliste est de savoir précisément la quantité de travail qu'il développe à chaque coup de pédale. En effet, contrairement à la nage dans un bassin ou la course à pied sur une piste d'athlétisme, où la vitesse de déplacement renseigne directement sur le niveau d'intensité de l'athlète, le cycliste, de par la diversité du terrain qu'il franchit, du phénomène d'aspiration important avec les vitesses élevées auxquelles il roule ou le vent qui le pousse ou le retient, ne peut pas se fier à sa vitesse de déplacement pour traduire le niveau réel de l'intensité de l'effort. La $P_{\text{méca}}$ qu'un cycliste produit correspond à la quantité de travail (W , en joules, J) qu'il réalise par unité de temps (en sec) pour se déplacer. La $P_{\text{méca}}$ est donc le résultat du mouvement généré par la mobilisation des différents segments du corps selon des niveaux de force et de vitesse variables pour avancer. Ce mouvement intervient après une cascade d'événements physiologiques et mécaniques qu'il est important de bien intégrer pour savoir ce qu'on analyse vraiment lorsqu'on mesure la $P_{\text{méca}}$ produite par un cycliste. La production de $P_{\text{méca}}$ résulte donc d'un processus complexe qui répond à la mise en action de différents systèmes fonctionnels, sollicitant les mécanismes physiologiques, biomécaniques et psychologiques du sportif à différents niveaux en l'obligeant à mettre en place des stratégies d'adaptation et de gestion de l'effort (Grappe, 2012). L'analyse globale de l'activité montre que pédaler entraîne une dépense énergétique qui résulte de l'équivalent métabolique de toutes les forces générées par les muscles (Minetti, 2011). La figure 1, adapté de Minetti (2011), décrit l'ensemble des travaux mécaniques sous-jacents issus de la dépense énergétique (E) lors du pédalage en cyclisme.

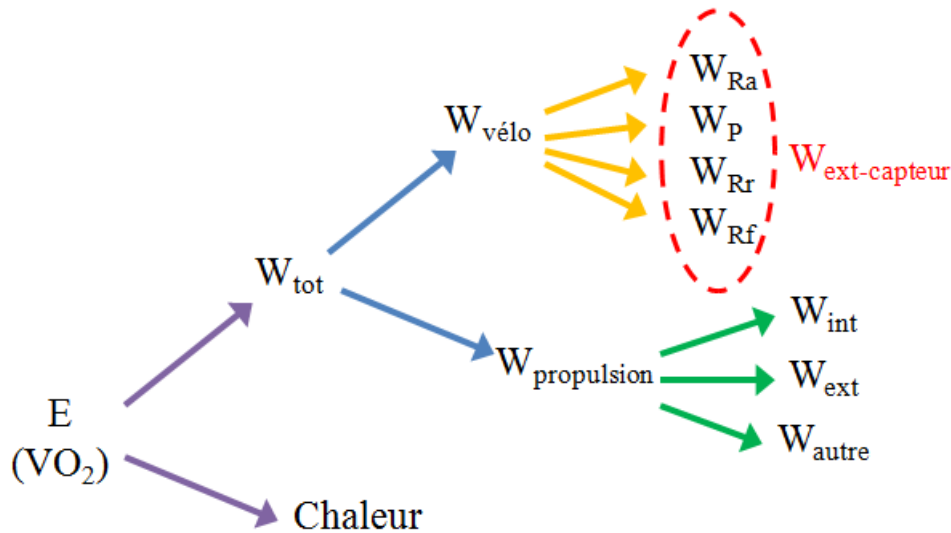


Figure 1 Cascade de la dépense énergétique totale aux différentes formes de travail mécanique généré (adapté de Minetti, 2011)

Comme le calcul du rendement brut le caractérise, la dépense énergétique (E), mesurable à partir de la consommation d'oxygène ($\dot{V}O_2$), résulte de la production de chaleur (thermolyse) et du travail mécanique total (W_{tot}) (Ettema G. et Loras, 2009). W_{tot} se décompose sous deux formes de travail : le travail face aux conditions environnementales externes entraînant l'avancement du système cycliste - vélo ($W_{vélo}$) et le travail lié à l'appareil propulsif : l'homme en mouvement ($W_{propulsion}$).

$W_{propulsion}$ concerne principalement le travail résultant des mouvements du centre de masse (W_{ext}) et le travail interne (W_{int}) correspondant à l'activité du système musculaire pour assurer la mobilisation des segments corporels. De plus, il convient de préciser qu'il existe également d'autres formes de travail plus mineur (W_{autre}) intervenant en amont du travail utile à l'avancement, comme par exemple l'énergie dépensée qui se dissipe lors de la poussée sur la pédale avec la déformation de la chaussure et de la pédale. De nombreuses études depuis les premiers travaux de Fenn (1930) se sont intéressées au calcul de $W_{propulsion}$ à travers l'étude du travail interne et externe du centre de masse en cyclisme (Thys, 2001 ; Hansen *et al.*, 2004 ; Ettema G. et Loras, 2009 ; Minetti, 2011). En effet, les connaissances sont encore aujourd'hui restreintes en ce qui concerne les transferts d'énergie qui peuvent s'opérer au niveau du centre de masse, ainsi qu'entre le travail interne et le travail externe, dans les différentes positions utilisées par les cyclistes, notamment en danseuse. Des modèles mathématiques permettent de mieux maîtriser cette notion de travail interne mais il est encore impossible aujourd'hui de le mesurer en routine (Minetti, 2011).

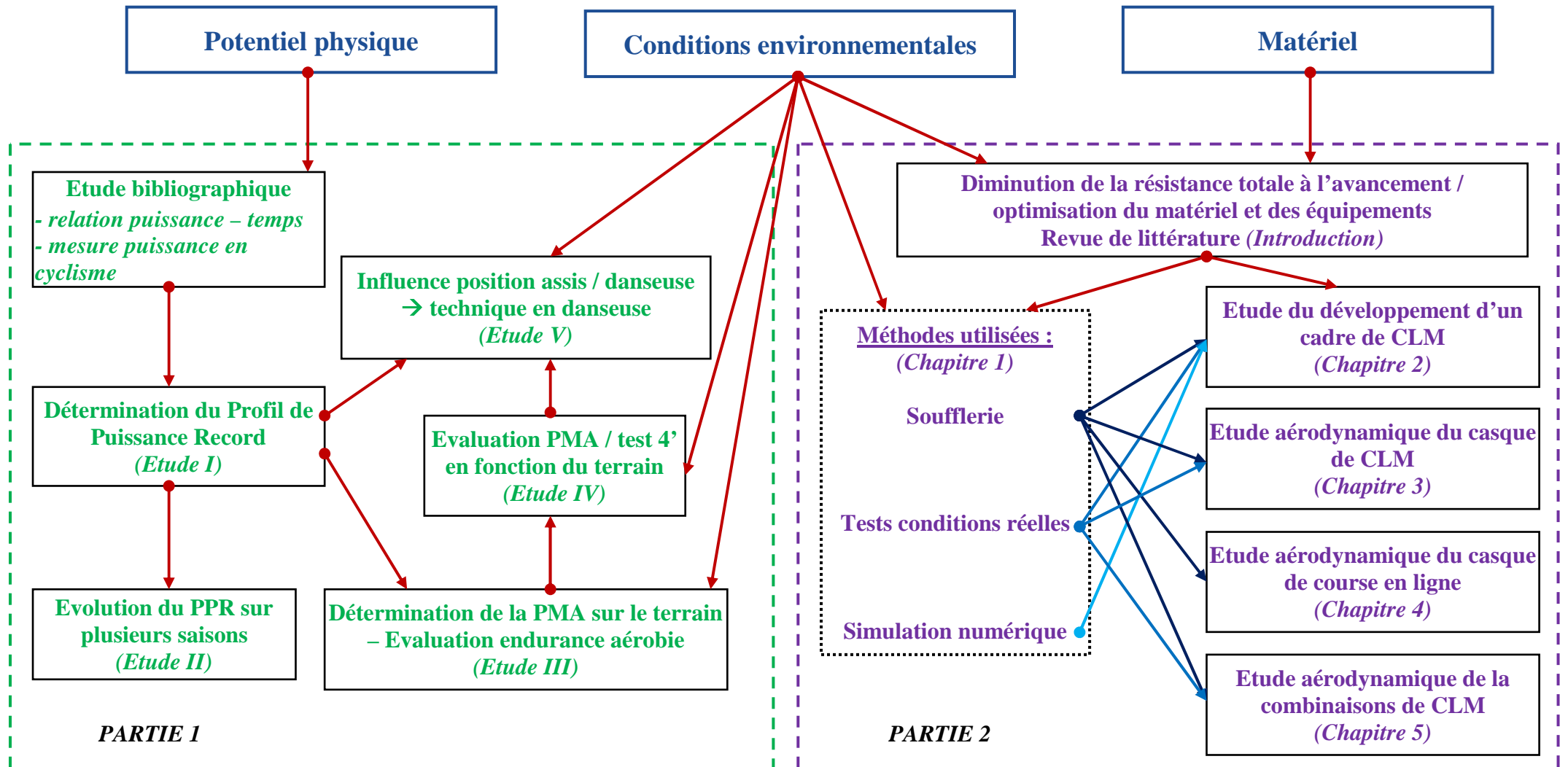
La deuxième forme de travail composant W_{tot} correspond au travail produit pour faire avancer le système homme – machine dans l'espace ($W_{\text{vélo}}$). Ainsi, $W_{\text{vélo}}$ résulte du travail produit pour vaincre les différentes résistances à l'avancement: la résistance de l'air (W_{Ra}), la résistance face à la gravité (W_{P}), la résistance de roulement (W_{Rr}) et la résistance de friction (W_{Rf}). La somme de W_{Ra} , W_{P} , W_{Rr} , et W_{Rf} équivaut au travail mécanique externe, ce qui est réellement mesuré sur le vélo par les capteurs de puissance ($W_{\text{ext-capteur}}$). Par conséquent, il est important de bien intégrer que la $P_{\text{méca}}$ mesurée et analysée en routine avec des capteurs de puissance sur les vélos ne quantifie pas l'ensemble du travail fourni (W_{tot}) lors de l'effort. Elle correspond seulement à la part de l'énergie produite par le cycliste pour avancer et lutter contre les résistances qui s'opposent à son avancement. $W_{\text{ext-capteur}}$ est une variable biomécanique centrale en cyclisme, qui est directement en lien avec l'effort réel produit par l'organisme. Elle constitue donc un critère objectif de la performance physique réalisée. Avec la démocratisation de l'utilisation des capteurs de puissance sur le terrain à l'entraînement et en compétition, on peut s'intéresser à la relation propre à chaque athlète qui existe entre la $P_{\text{méca}}$ ($W_{\text{ext-capteur}}$) et le temps sur des efforts intenses. En effet, l'étude de la relation $P_{\text{méca}}$ - temps se base sur une loi du fonctionnement physiologique de l'homme qui veut que plus le niveau d'intensité de l'exercice est élevé, plus la durée de l'effort est courte. L'utilisation des capteurs de puissance en compétition s'avère pertinent puisque c'est généralement dans ces conditions que les athlètes arrivent à exploiter le maximum de leur potentiel. La notion de record prend ici tout son sens puisqu'il devient possible de classer le niveau des performances établies par un cycliste en considérant ses $P_{\text{méca}}$ les plus élevées comme des $P_{\text{méca}}$ records. Le but de l'étude initiale de ce projet de recherche était de poser les bases d'une méthode innovante permettant de quantifier le niveau de performance des cyclistes à partir de la mesure en routine de la $P_{\text{méca}}$ produite par les cyclistes en conditions réelles sur le terrain. L'objectif de cette méthodologie était de s'intéresser à la globalité de la relation $P_{\text{méca}}$ record – temps sur des durées d'exercice allant de 1 sec à plusieurs heures. Ainsi, ce travail s'insère dans une dimension de la physiologie et de la biomécanique de l'exercice qui doit autoriser une meilleure compréhension du fonctionnement de la machine Humaine en regard de l'exploitation du potentiel physique, notamment pour établir des performances maximales. Les hypothèses que nous posions étaient que la nouvelle méthode : 1) soit utilisable en routine par le plus grand nombre, 2) soit peu coûteuse, 3) autorise la détermination du potentiel physique global du sujet et, 4) permette l'optimisation du processus d'entraînement. Dans la continuité, d'autres études ont ensuite été menées afin de démontrer les applications directement utilisables sur le terrain auprès d'athlètes sur le suivi et l'évaluation du potentiel

physique dans le but d'améliorer les processus d'entraînement du cycliste. Il est à noter qu'au cours de ce travail, nous avons également cherché à mieux comprendre l'influence de certaines conditions sur la production de $P_{\text{méca}}$ par un cycliste, qui impactent la relation $P_{\text{méca}}$ record - temps des athlètes. En effet, nous verrons que le profil du terrain ou encore la technique associée à la position danseuse ont une influence sur les niveaux de $P_{\text{méca}}$ produite par les athlètes. Cette dernière étude menée sur la position danseuse revêt un caractère très original étant donné qu'elle s'est intéressée à faire le lien entre $W_{\text{vélo}}$ et $W_{\text{propulsion}}$ dans cette position, notamment en analysant les transferts d'énergie au niveau du centre de masse.

Par ailleurs, le matériel et les équipements utilisés par un cycliste ont une part importante dans la performance réalisée au regard de la $P_{\text{méca}}$ produite à partir de $W_{\text{vélo}}$. Comme précédemment expliqué, lorsqu'il se déplace, le système cycliste – vélo - équipements fournit plusieurs types de travail mécanique pour lutter contre différentes résistances à l'avancement (W_{Ra} , W_{P} , W_{Rr} et W_{Rf}). Ces travaux mécaniques sont directement influencés par l'interface du cycliste avec son vélo et ses équipements. Par conséquent, il existait, à l'aube de ce doctorat, une volonté forte des dirigeants de l'équipe FDJ de renforcer le lien qui existe entre l'équipe et les différents partenaires techniques, fournisseurs de l'ensemble du matériel et des équipements utilisés par les cyclistes. Leur souhait était de créer des projets R&D avec ces partenaires pour améliorer l'ensemble des équipements et du matériel utilisé. Avec ces projets axés sur l'amélioration de l'interface homme – machine, l'optimisation de la performance s'appréhendait sous un angle technologique. Ainsi, nous avons étudié les effets du matériel et des équipements utilisés sur les différentes forces contre lesquelles lutte en permanence le cycliste lors de son avancement. L'étude de la $P_{\text{méca}}$ mesurée directement sur le vélo ($W_{\text{ext-capteur}}$) dans différentes conditions de terrain et la mesure / modélisation des effets de l'air, notamment en soufflerie, avec différentes conditions de matériel et équipements (cadre, casque, vêtement...) avait pour objectif d'orienter et favoriser les améliorations du système cycliste - vélo – équipements.

Mes missions de recherches au cours de ce travail de thèse se sont donc axées sur l'amélioration de la performance autour d'une variable centrale qui est la $P_{\text{méca}}$ produite par le cycliste selon 2 axes principaux : 1) l'évaluation et le suivi du potentiel physique avec pour but l'amélioration du processus d'entraînement et 2) l'optimisation de l'interface homme – machine à partir de différents projets de R&D sur le matériel et les équipements utilisés par l'équipe FDJ.

Etude de la puissance mécanique comme variable d'amélioration de la performance en cyclisme à travers l'interface homme - machine



Structuration de la thèse

Le document est structuré en deux parties : une première partie portant sur l'évaluation et le suivi du potentiel physique du cycliste. Cette partie a fait l'œuvre de cinq articles à publication dans des revues scientifiques internationales qui sont successivement présentés après une revue de littérature articulée autour des thématiques de la puissance et de la relation puissance – temps, puis plus spécifiquement dans le cyclisme. La première étude présentée détermine la méthodologie de détermination de la relation puissance – temps propre à chaque cycliste comme moyen d'évaluation du potentiel physique et d'amélioration du processus d'entraînement. Dans la continuité, une étude de cas montre comment le PPR associé à la quantification de la charge d'entraînement permet de rendre très performant le suivi de l'entraînement du cycliste. Une troisième étude présente un protocole d'évaluation de la puissance maximale aérobie (PMA) et de la capacité d'endurance aérobie sur le terrain à partir du PPR. Enfin, deux études complémentaires analysent l'influence du profil du terrain sur le niveau de $P_{méca}$ en conditions réelles et lors de la technique en position de danseuse à travers les différents transferts d'énergie ayant lieu au niveau du centre de masse du cycliste.

La deuxième partie concerne exclusivement les travaux R&D menés sur l'optimisation de l'interface homme – machine. Les résultats de ces recherches n'ont pas fait l'œuvre de publications scientifiques étant donné le caractère confidentiel des résultats, notamment dans le contexte concurrentiel de performance dans lequel l'équipe FDJ évolue. Ils ont été rapportés dans des comptes rendus internes à destination du département R&D de l'équipe FDJ et des partenaires techniques associés. La partie débute par un rappel sur les différentes résistances à l'avancement suivi d'une étude bibliographique présentant les méthodologies existantes en termes d'évaluation et de diminution de la traînée aérodynamique du système cycliste – vélo - équipements. Ensuite, après avoir détaillé les différentes méthodologies utilisées, nous présentons les résultats obtenus au cours des différentes études conduites pour optimiser d'une part, en contre-la-montre (CLM), le cadre, le casque et la combinaison et d'autre part, en course en ligne, le casque.

**PARTIE 1 : EVALUATION DU POTENTIEL
PHYSIQUE**

CHAPITRE 1 : Etude bibliographique

La revue de littérature de ce chapitre présente les nombreuses recherches conduites dès le début du XX^{ème} siècle sur la relation intensité – temps qui ont étudié et analysé la décroissance de l'intensité maximale soutenue en fonction du temps. L'étude bibliographique nous conduira sur des études plus récentes menées dans le cyclisme à partir desquelles nos différents travaux se sont appuyés pour approfondir l'analyse du potentiel physique à partir de la mesure de la $P_{méca}$ sur le terrain.

1. Etude de la relation intensité – temps

La relation entre l'intensité maximum en fonction du temps a largement été étudiée au cours du XX^{ème} siècle. Selon le sport et l'activité pratiquée, cette relation est définie par une vitesse, une puissance ou encore une consommation d'oxygène. Cela a commencé par l'analyse descriptive des différents records du monde en course à pied. Des modèles empiriques ont ensuite été utilisés pour prédire des performances avant de se baser sur les caractéristiques du métabolisme énergétique de l'homme. Ces derniers modèles, appelés théoriques ou bioénergétiques (Bocquet et Billat, 1999 ; Bosquet *et al.*, 2002) ont intéressé de nombreux scientifiques, voulant modéliser et comprendre les mécanismes de l'endurance humaine. Toutes les équations ne sont pas recensées, car le but n'est pas une finalité mathématique et statistique mais plutôt de comprendre les mécanismes physiologiques et apports de chacun des nouveaux modèles.

1.1. Modèles empiriques

Lors de la première moitié du XX^{ème} siècle, des modèles mathématiques, dits empiriques, ont été élaborés afin de décrire la relation intensité – temps dans différentes activités. L'objectif de ces modèles est de tenter de mieux appréhender l'endurance humaine à partir de l'étude de la relation entre l'intensité maximale, définie généralement par une vitesse, et le temps de maintien sans proposer d'analyse d'ordre physiologique (Bocquet et Billat, 1999).

Le premier article décrivant la relation entre une intensité et le temps est l'œuvre de Kennelly (Kennelly, 1906 ; Billat, 2001) qui a étudié les records en course à pied à partir de la relation

vitesse - temps. Il a également comparé la pente de cette relation dans différents sports comme le cyclisme, le patinage, la natation...

Par la suite de nombreux auteurs dont Meade (1916), Grosse-Lordemann et Müller (1936), Francis (1943), Tornvall (1963) ont continué à étudier de façon empirique la relation qui lie la vitesse avec le temps à partir d'équations de type logarithmique ou hyperbolique différentes, toujours en étudiant les records en fonction de la distance. Frederick (1986), après avoir longtemps étudié cette relation dans plusieurs sports, a recensé tous les records du 100 m au marathon année par année. La figure 2 illustre l'évolution des records sur chaque distance au fil des années.

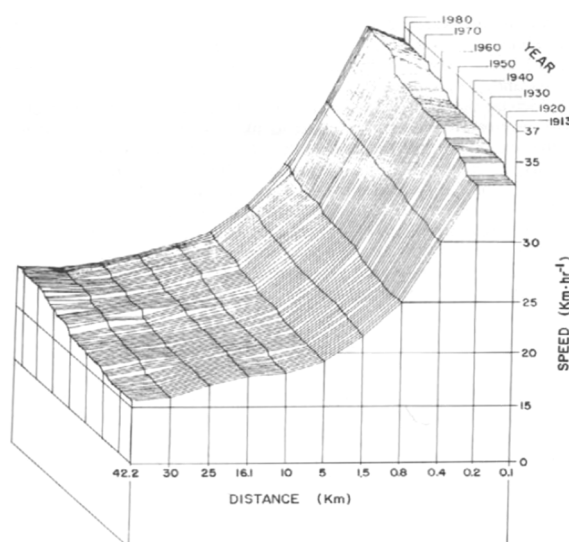


Figure 2 Evolution des records du Monde en course à pied de 1913 à 1985, du 100 m au marathon (temps de chaque épreuve rapporté en vitesse moyenne) (Frederick, 1986)

Morton et Hodgson (1996) ont recensé de nombreux articles traitant de la relation entre la puissance et le temps. Il a comparé plusieurs modèles mathématiques de la deuxième partie du XX^{ème} siècle et les a superposés dans un graphique (figure 3) en reprenant les équations logarithmiques et exponentielles suivantes :

- Grosse-Lordeman et Müller (1973) : $\text{Log } t = a \cdot \log P + b$ (trait plein) (1)
- Bigland – Ritchie et Woods (1984) $\left. \begin{array}{l} \text{Log } t = a - b \cdot P \text{ (grands pointillés)} \\ P = a + b \cdot e^{-ct} \text{ (petits pointillés)} \end{array} \right\}$ (2)
- Hopkins et coll (1989), Aunola et coll (1990)... $\left. \begin{array}{l} \text{Log } t = a - b \cdot P \text{ (grands pointillés)} \\ P = a + b \cdot e^{-ct} \text{ (petits pointillés)} \end{array} \right\}$ (3)

Il a souligné que dans cette étude, c'est l'équation 1 de Grosse Lordeman et Müller ($R^2=0,98$) qui décrivait le mieux le cas concret auquel il avait appliqué les 3 modèles.

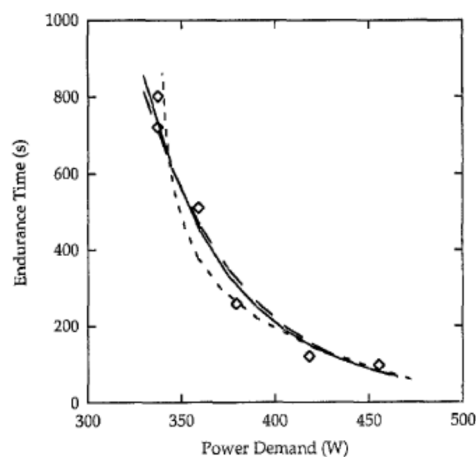


Figure 3 Comparaison de 3 modèles mathématiques avec la puissance en abscisse à partir d'un cas concret (Grosse – Lordeman et Muller (trait plein), Bigland – Ritchie et Woods (grands pointillés) et Hopkins et coll (petits pointillés)) (Morton et Hodgson, 1996)

En poursuivant les travaux de Kennelly, Meade (1956) a beaucoup étudié empiriquement la relation vitesse – temps. Il en a déduit qu'elle ne correspondait pas au logarithme décrit par son précurseur. Il affirme que la relation doit permettre d'identifier les aptitudes énergétiques qui produisent la performance et qu'il est nécessaire de connaître les différentes caractéristiques bioénergétiques d'un athlète afin de mieux comprendre la forme de la relation intensité – temps. Il soulève donc le problème des modèles empiriques qui sont essentiellement descriptifs mais qui ne permettent pas de mieux appréhender les mécanismes sous-jacents expliquant l'endurance humaine.

1.2. Modèles bioénergétiques

Un modèle théorique est différent d'un modèle empirique car il apporte une interprétation aux résultats observés, il ne fait pas que décrire l'allure de la relation intensité – temps. Le but de ces modèles est de comprendre les mécanismes mis en jeu dans la capacité à soutenir une intensité donnée le plus longtemps possible (ou la capacité à développer la plus haute intensité possible sur un temps donné) : ce que Billat définit comme « l'endurance athlétique » d'un sujet (Billat, 2003).

Le premier véritable chercheur à avoir essayé d'apporter une argumentation physiologique à la relation vitesse – temps est le physiologiste Hill (1927). Il a expliqué la forme hyperbolique de la relation (figure 4) en introduisant les concepts de consommation maximale d'oxygène et de dette d'oxygène (il est le précurseur de ces concepts). En effet, en établissant l'équation 4

il prend en compte la capacité des stocks énergétiques, la consommation d'oxygène au cours de l'exercice et les caractéristiques propres à chaque athlète :

$$V = \frac{S}{t \cdot B} + \frac{R-A}{B} \quad (4)$$

Où V est la vitesse de déplacement, S la capacité énergétique totale (S comme stock), t est le temps de course et R le débit d'énergie au cours de l'exercice. A et B sont des paramètres dépendants des caractéristiques physiologiques du coureur : A étant la consommation d'oxygène de repos et B, le débit d'énergie pour une vitesse donnée, exprimée en équivalent d'oxygène à une vitesse donnée

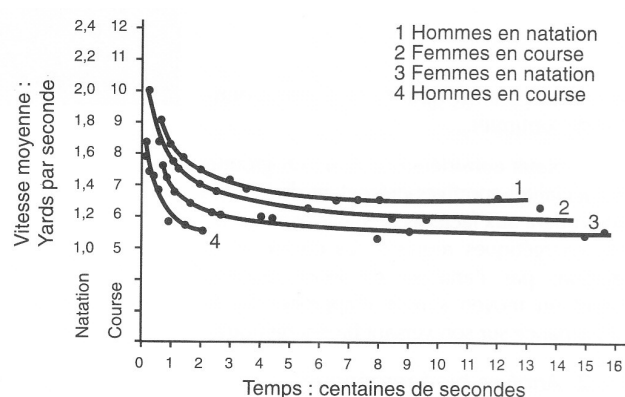


Figure 4 Relation vitesse – temps en course à pied et en natation (Hill, 1927) (adapté par Billat, 2003)

Henry (1954) tenta d'expliquer la décroissance de la vitesse soutenue avec la durée par un épuisement des réserves énergétiques. Or nous savons aujourd'hui que cela est faux (sauf pour les stocks de phosphagènes : ATP = énergie chimique) puisque l'énergie ne provient pas des mêmes substrats selon la durée et le niveau d'intensité de l'exercice. De plus, les réserves énergétiques pour la glycolyse et le processus aérobie ne sont pas des facteurs limitant.

1.2.1. Concept de la puissance critique

Le modèle de la puissance critique décrit la capacité d'un sportif à soutenir différents niveaux de travail mécanique en fonction du temps. Ainsi, le modèle exprime la relation entre une intensité d'exercice et le temps maximal de maintien de cette intensité. Le modèle trouve son origine dans les travaux de Monod et Scherrer qui se sont inspirés des travaux de Hill (1927) et de Henry (1949) pour décrire la relation hyperbolique entre la durée maximale d'un exercice (t_{lim}) et l'intensité à partir d'exercice mobilisant certains groupes musculaires (moins

d'un tiers de la masse musculaire totale) (Scherrer *et al.*, 1954 ; Scherrer et Monod, 1960 ; Monod et Scherrer, 1965). Leurs travaux ont montré qu'à partir de la relation hyperbolique entre la $P_{méca}$ de l'exercice et le temps limite de maintien, il existe :

- une limite pour laquelle la $P_{méca}$ peut être maintenue sans épuisement. Elle dépend essentiellement de la voie énergétique aérobie. Elle est appelée puissance critique (P_{crit}).
- une composante dans la production d'énergie par la voie anaérobie appelée capacité de travail anaérobie (W'), qui représente une quantité d'énergie limitée, disponible pour développer une $P_{méca}$ supérieure à P_{crit} et aboutissant à l'épuisement lorsqu'elle est totalement consommée.

Monod et Scherrer ont donc été les premiers à avoir observé qu'en exprimant $P_{méca}$ en fonction de t_{lim} on obtient une courbe caractéristique qui montre que la $P_{méca}$ diminue en suivant une fonction hyperbolique (figure 5).

Ainsi, Monod et Scherrer ont modélisé P_{crit} en associant l'équation de la puissance $P = W \cdot t$ avec la relation linéaire observée entre la quantité de travail produit et la durée à partir de tests maximaux réalisées à différentes intensités. Par conséquent, le calcul d'une quantité totale de travail (W) s'exprime sous la forme :

$$W = W' + P_{crit} \cdot t \quad (5)$$

Où W correspond à une quantité de travail produit, W' la capacité de travail anaérobie, P_{crit} la P_{crit} et t la durée maximale pendant laquelle le travail W a été produit.

Le modèle peut également évaluer la capacité de travail anaérobie (W') (figure 5) en s'exprimant sous la forme :

$$W' = \frac{P_{méca} - P_{crit}}{t} \quad (6)$$

Où W' correspond à la capacité de travail anaérobie, $P_{méca}$ une puissance mécanique produite, P_{crit} la puissance critique et t la durée pendant laquelle la puissance P a été produite.

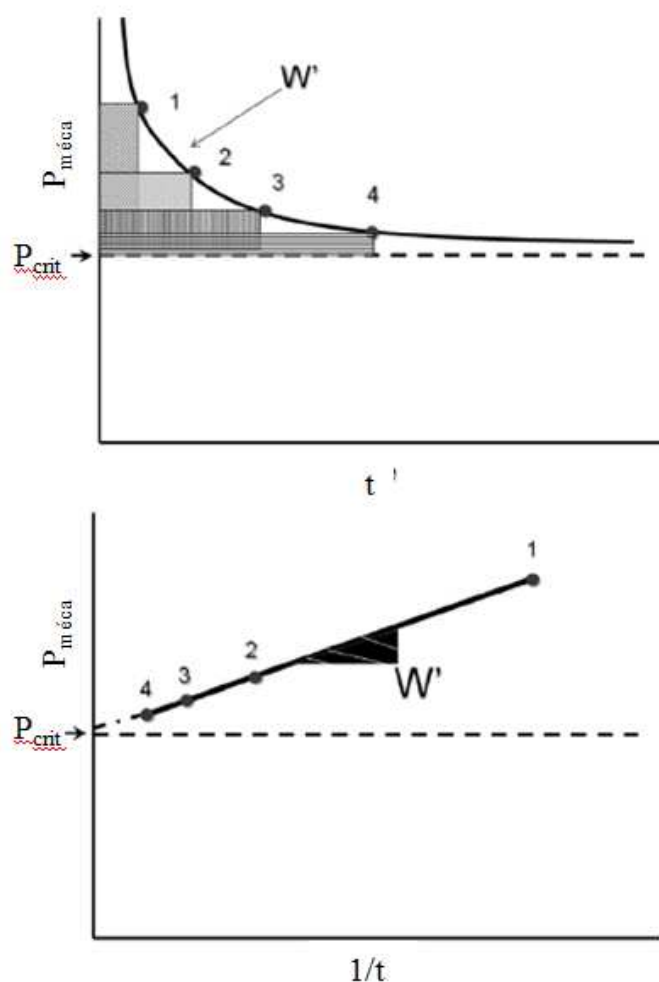


Figure 5 En haut : illustration de la relation $P_{méca} - \text{temps}$. Les chiffres 1 à 4 représentent les $P_{méca}$ atteintes en fonction des durées d'épuisement pour des tests indépendants. En bas : détermination de P_{crit} et W' à partir de la relation $P_{méca} - 1/\text{temps}$ (adapté de Jones A. M. et al., 2009)

Ettema (1966) a observé des similitudes dans l'étude des différents records du Monde de l'époque, suggérant que cette notion de P_{crit} pouvait être étendue aux activités de course à pied, de cyclisme et de natation mais seulement sur des temps de 4 à 30 min. Mais ce sont surtout Moritani *et al.* (1981) et Whipp *et al.* (1982) qui ont extrapolé ce concept à l'échelle de l'homme à travers des tests maximaux à différents niveaux d'intensité sur cyclo-ergomètre. Morton (2006) résume le concept de la P_{crit} en quatre principes :

- 1) l'énergie produite pendant l'exercice provient uniquement des voies anaérobie et aérobie, leur part d'intervention étant déterminé selon le niveau de l'intensité d'exercice ;
- 2) la capacité de production d'énergie par la voie aérobie est infinie mais la puissance du système est limitée par la P_{crit} ;
- 3) à l'inverse, le système anaérobie n'est pas limité en puissance mais par la capacité de

travail anaérobie (W') ;

- 4) l'épuisement atteint lors de l'impossibilité de continuer une intensité d'exercice survient lorsque la capacité de travail anaérobie a été épuisée.

D'un point de vue physiologique, P_{crit} correspond au niveau de $P_{méca}$ maximale qui peut être maintenue pendant un temps relativement long et qui est en théorie infini. Lors d'un exercice à une $P_{méca}$ supérieure à P_{crit} , l'homéostasie métabolique se dégrade progressivement avec notamment une accumulation importante de lactate sanguin (Jones A. M. *et al.*, 2009). Au contraire, lors d'un exercice à une $P_{méca}$ inférieure ou égale à P_{crit} , on remarque un état stable au niveau de la $\dot{V}O_2$ et de la concentration de lactate sanguin. Au niveau musculaire, Jones A. M. *et al.* (2008) et Vanhatalo *et al.* (2010) ont montré que lors d'exercices à une intensité supérieure à P_{crit} , les niveaux de phosphocréatine et de PH diminuaient sensiblement contrairement à des exercices à un niveau inférieur à P_{crit} où ils restaient stables. 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 du niveau de $P_{méca}$ maintenu (Poole *et al.*, 1988 ; Burnley *et al.*, 2006 ; Grappe, 2009).

Les fondements physiologiques de la capacité de travail anaérobie (W') évaluée à partir du concept de P_{crit} semblent moins clairs (Murgatroyd et Wylde, 2011 ; Clarke et Skiba, 2013). Selon l'interprétation classique, W' correspondrait à la totalité du travail mécanique produit grâce aux processus anaérobies lors d'un effort d'une intensité supérieure à P_{crit} mais il convient de rester prudent puisque ce paramètre ne peut être associé à un seul processus physiologique (Jones A. M. *et al.*, 2009 ; Vanhatalo *et al.*, 2010). Dans ce sens, des études récentes ont montré les liens qui existent entre W' et des exercices de haute intensité, qu'ils soient constants ou intermittents en laboratoire ou sur le terrain, au niveau des cinétiques de VO_2 , du lactate et de la récupération, notamment en ayant pour témoin des métabolites intramusculaires et sanguins (Ferguson *et al.*, 2010 ; Murgatroyd *et al.*, 2011 ; Skiba *et al.*, 2012 ; Chidnok *et al.*, 2013 ; Skiba, Fulford, *et al.*, 2014 ; Skiba, Jackman, *et al.*, 2014). Suite à ces travaux, des applications utilisables sur le terrain auprès de sportifs, notamment des cyclistes, ont été proposées à partir de l'évaluation de W' (Chidnok *et al.*, 2012 ; Noordhof *et al.*, 2013 ; Skiba, Fulford, *et al.*, 2014).

En pratique, la P_{crit} est généralement estimée après qu'un athlète ait réalisé plusieurs tests maximaux de différentes durées à intensité constante. Afin d'éviter un effet-fatigue, les tests sont isolés et réalisés sur plusieurs jours. La relation $P_{méca}$ – temps permet ensuite de caractériser P_{crit} et W' . Plus récemment, Vanhatalo *et al.* (2007) ont développé un test unique

pour évaluer ces paramètres en se dispensant du protocole de tests sur plusieurs jours. Dans ce test, le sujet réalise un effort « all-out » sur 3 min, c'est-à-dire qu'il donne le maximum de sa puissance sans gérer l'effort dès la première seconde en maintenant le plus haut niveau de $P_{méca}$ possible jusqu'à la fin des 3 min. 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 (figure 6). P_{crit} s'obtient en moyennant la $P_{méca}$ des 30 dernières secondes alors que W' est calculée en intégrant l'aire entre la courbe de $P_{méca}$ et la ligne horizontale équivalente à la $P_{méca}$ en fin de test.

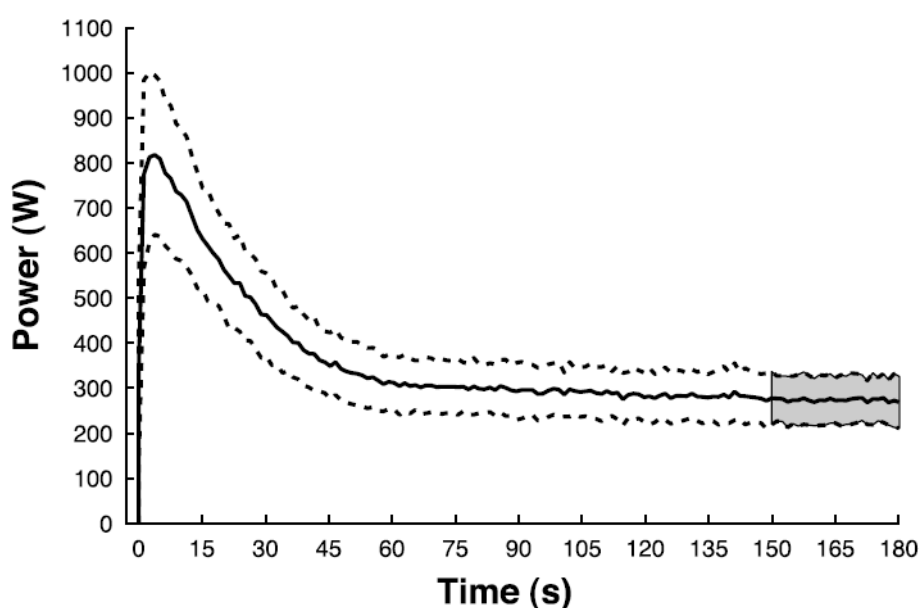


Figure 6 Evolution de la $P_{méca}$ moyenne de 14 sujets sur un test « all-out » 3 min. La zone grisée correspond à la moyenne des 30 dernières secondes à partir desquelles la P_{crit} est déterminée (Francis J. T. et al., 2010)

Bien que de nombreuses études se soient intéressées à la validation et la répétabilité de ce test pour évaluer P_{crit} et W' (Burnley *et al.*, 2006 ; Vanhatalo *et al.*, 2007, 2008a, 2008b ; Vanhatalo et Jones, 2009 ; Francis J. T. *et al.*, 2010 ; Chidnok *et al.*, 2012 ; Black *et al.*, 2014), il semble qu'il possède certaines limites notamment suivant les conditions dans lesquelles il est réalisé (type d'ergomètre, cadence, exercice précédant le test..) (Bergstrom *et al.*, 2013a, 2013b ; Karsten, Jobson, Hopker, Passfield, *et al.*, 2014).

1.2.2. Limites du modèle hyperbolique de la P_{crit}

Le modèle hyperbolique entre l'intensité de l'exercice et le temps a été utilisé pour décrire un modèle théorique simple dont est issu P_{crit} mais de nombreux physiologistes l'ont remis en cause puisqu'il omet de nombreuses considérations comme les mécanismes physiologiques de la contraction musculature et de la fatigue, de l'endurance (durée d'exercice inférieure à 30 min), du déficit accumulé en oxygène en début d'exercice... Il ne permet pas également de définir précisément le délai d'intervention de chacun des processus métaboliques. Parmi ces nombreuses recherches, les travaux de Wilkie (1980), Peronnet et Thibault (1987), Morton (1986) ou encore Busso et Chatagnon (2008) ont permis d'améliorer le modèle hyperbolique simple de Monod et Scherrer.

Wilkie (1980) a apporté une correction au modèle hyperbolique simple en ajoutant un facteur à la P_{crit} puisque la puissance aérobie n'est pas optimale immédiatement dès le début d'un exercice mais le devient suivant une cinétique d'environ 50 sec. Certes, cet apport devient négligeable sur des exercices de grandes durées, mais il est important sur des efforts plus courts.

Morton (1986) a également proposé un modèle théorique sur la relation puissance - temps basé sur les trois voies métaboliques de l'utilisation des phosphagènes, de la glycolyse anaérobie et de la puissance aérobie. Il est censé représenter la mise en jeu des différents processus bioénergétiques pendant l'exercice. Comme les modèles de Wilkie et Peronnet, il ajoute au modèle hyperbolique simple, le délai de mise en jeu des processus aérobie et le déclin progressif de la puissance aérobie avec l'augmentation de la durée de l'exercice. Cependant, il ajoute une limite maximale à la courbe. En effet, selon lui, l'hyperbole de la relation puissance - temps doit croiser le temps 0 afin de prendre en considération une valeur de puissance instantanée maximale (valeur représentant la voie des phosphagènes), contrairement au modèle de Peronnet et Thibault. Le modèle de Morton prend également en compte le concept de seuil anaérobie, puisque selon lui, dans la relation puissance - temps, ce seuil entraîne un retard dans la mise en action de la glycolyse anaérobie.

Busso et Chatagnon (2008) ont proposé une extension du modèle puissance - temps permettant d'estimer la production d'énergie aérobie et anaérobie à partir de la différenciation entre la P_{crit} et la PMA.

De manière plus générale, Clarke et Skiba (2013) ont rejeté un à un les quatre principes définis préalablement sur lesquels se basaient la P_{crit} considérant qu'ils allaient à l'encontre des lois physiologiques :

- 1) La $P_{méca}$ produite lors d'un exercice provient des trois voies métaboliques de production d'énergie : la voie des phosphagènes, la glycolyse et la phosphorylation oxydative de multiples substrats ;
- 2) La $P_{méca}$ continue de diminuer en dessous de l'asymptote défini par la P_{crit} après un certain temps d'effort. L'applicabilité du concept de P_{crit} s'applique sur des efforts durant de 2 à 30 min, voir 60 min chez certains individus.
- 3) La $P_{méca}$ maximale pouvant être générée par les processus anaérobies est limitée en raison des niveaux maximaux de force et de vitesse pouvant être générés.
- 4) W' , la capacité de travail anaérobie, n'est pas systématiquement épuisée en fin d'exercice maximal. Dans les tests d'efforts constants, le sujet arrête l'exercice lorsqu'il ne peut plus maintenir l'intensité d'effort demandé.

Par conséquent, le concept de la P_{crit} tel qu'il est utilisé aujourd'hui dans le sport notamment dans l'évaluation des athlètes se fonde sur des principes qui ont été révisés depuis sa définition initiale. En résumé, la P_{crit} est évalué puisqu'elle représente le niveau de $P_{méca}$ le plus élevé auquel la $\dot{V}O_2$ et la concentration de lactate sont stabilisées (Skiba *et al.*, 2012 ; Black *et al.*, 2014 ; Karsten, Jobson, Hopker, Jimenez, *et al.*, 2014).

Au total, la relation intensité – temps peut être définie comme une caractéristique inhérente de la bioénergétiques musculaire (Jones A. M. *et al.*, 2009). Elle caractérise un vaste spectre d'intensités d'exercice qui induisent une inévitable progression de l'augmentation de la perturbation métabolique intramusculaire qui finalement limite la tolérance de l'exercice (Grappe, 2009).

1.2.3. Autres modèles bioénergétiques

L'amélioration des connaissances en physiologie de l'exercice combinée aux différentes modélisations de la relation intensité - temps ont permis de mieux comprendre la mise en jeu des différentes voies métaboliques ainsi que leurs caractéristiques en fonction de la l'intensité de l'effort réalisé. Dans ce sens, Billat (2003) a observé justement que l'on peut diviser la courbe puissance – temps en plusieurs tranches de durée d'exercices pour lesquelles la perte de puissance est peu sensible (par exemple entre 20 et 30 sec) et pour lesquelles au contraire la perte de puissance est importante (par exemple entre 1 et 2 min).

Peronnet et Thibault (1987) ont proposé un modèle physiologique d'analyse de la performance en course à pied. Il prend en compte les contributions et caractéristiques des différents métabolismes énergétiques c'est-à-dire du délai d'ajustement de la consommation d'oxygène, de la glycolyse au début de l'exercice et de la réduction de la puissance aérobie en fonction du temps total de course pour les épreuves de longue durée. De plus, ils supposent que la vitesse correspondant à la puissance maximale aérobie peut être maintenue pendant un temps limite de 7 min (d'après une moyenne des données de la littérature) et que la puissance d'origine aérobie décroît de façon logarithmique pour des temps de course supérieurs à 7 min. Leur modélisation de la performance donne une très bonne description de la courbe de performance du 200 m au marathon.

La courbe d'Howald (1975) (figure 7) illustre la mise en jeu et la part des différentes voies métaboliques dans la production d'énergie selon la durée et l'intensité de l'effort. Le métabolisme anaérobie alactique intervient immédiatement dès le début d'un effort ou lors d'un effort maximal bref à partir de l'utilisation directe d'ATP, se trouvant dans la cellule musculaire, ou à partir de sa resynthèse grâce à la créatine phosphate. Cette voie métabolique possède un grand débit, permettant de réaliser des exercices avec des $P_{méca}$ très élevées, mais une capacité limitée en raison des faibles stocks de phosphagènes. Si l'exercice se poursuit ou si le niveau d'intensité reste élevé, le métabolisme anaérobie lactique s'enclenche grâce la glycolyse anaérobie. Cette dernière correspond à la mise en route de la voie d'Embden Meyerhof qui permet une production d'ATP à partir de glucose et de glycogène, accompagnée d'une forte production de lactate. Sa capacité est plus importante que celle de la voie des phosphagènes mais toutefois limitée car elle entraîne une acidose métabolique importante. Enfin, le métabolisme purement aérobie (Cycles de Krebs, chaînes respiratoires...) correspond à l'oxydation de divers substrats (glucides, acides gras, voir protéines) pour produire de l'ATP. Les processus oxydatifs ont un débit limité en raison du délai requis pour la synthèse d'ATP, ce qui entraîne des efforts avec des $P_{méca}$ moins élevées qu'avec les deux métabolismes anaérobies. En revanche, ils possèdent une capacité importante puisque les stocks de substrats sont quasi-infinis. Il est convenu de bien considérer le fait que les différentes voies métaboliques n'interviennent pas de manière indépendante mais plutôt que la part de leur intervention dépend de l'intensité et de la durée de l'effort.

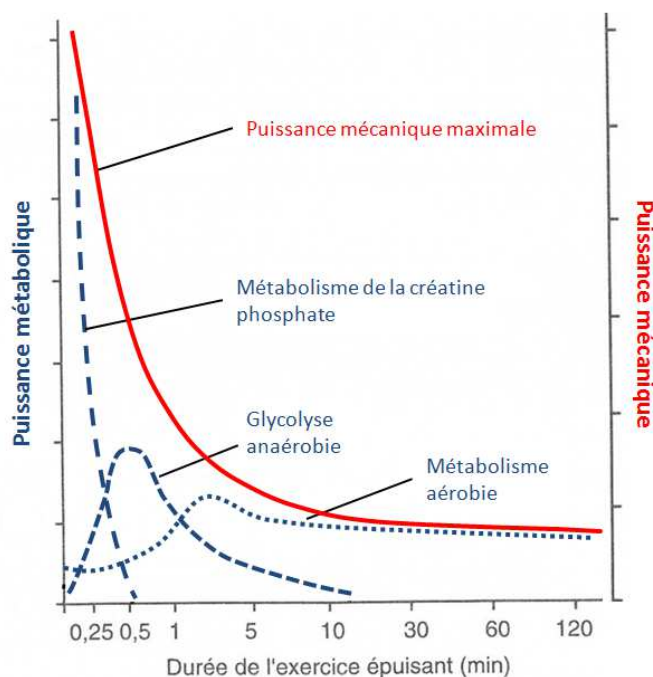


Figure 7 Diminution de la $P_{méca}$ maximale expliquée par rapport à la part de production énergétiques des différents métabolismes (adapté de la courbe d'Howald)

Margaria (1976) a innové en conceptualisant les mécanismes bioénergétiques lors de l'exercice à partir d'un modèle hydraulique. Le principe est simple : on considère un liquide contenu dans différents réservoirs. Les réservoirs représentent les différentes sources d'énergie métabolique et l'écoulement du liquide, la puissance développée durant l'exercice. Au départ, Margaria avait conceptualisé les différentes hypothèses relatives au concept de P_{crit} . Wilkie (1980) puis à nouveau Margaria ont amélioré ce modèle à partir des nouvelles connaissances physiologiques de l'époque. Mais le modèle le plus élaboré provient de Morton (1990) avec son modèle hydraulique à trois composantes (figure 8) : le « Margaria – Morton Model » (M – M Model).

Le modèle de Morton comporte 3 réservoirs :

- 1) un pour les voies oxydatives (métabolisme aérobie : cycle de Krebs, chaînes respiratoires...) (O) non limité en capacité,
- 2) un pour le métabolisme anaérobie alactique (phosphagènes) (AL),
- 3) un pour la voie anaérobie lactique (glycolyse anaérobie ou voie d'Embden Meyerhof) (L) comportant un tuyau B censé représenter la production énergétique *via* la glycolyse anaérobie au tout début d'un exercice.

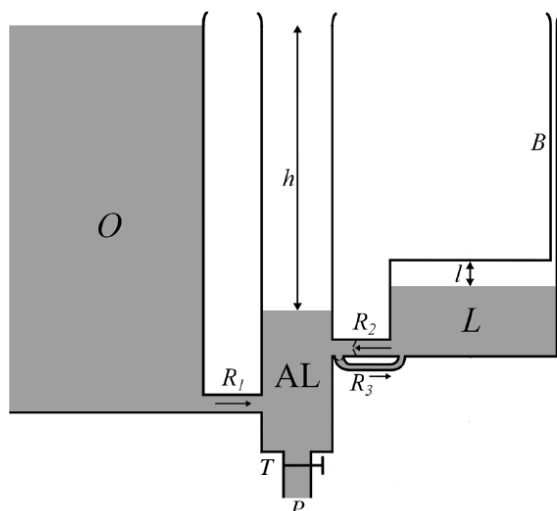


Figure 8 le modèle hydraulique à 3 composantes de Morton (adapté de Sundström et al. (2014))

Le liquide contenu dans ces récipients représente l'énergie disponible et s'écoule par le robinet (T) ; l'écoulement étant censé schématiser une dépense énergétique plus ou moins puissante (P) selon le débit (au repos T étant fermé). Ces réservoirs sont raccordés par des tubes (R_1 , R_2 où le liquide va de L à AL et R_3 où le liquide va de AL à L) qui assurent l'apport des différentes sources d'énergie vers le réservoir AL d'où la production d'énergie provient.

Si le robinet T est ouvert, ce qui correspond à une charge de travail P , le niveau d' AL diminue, entraînant un écoulement à travers R_1 (augmentation de la consommation d'oxygène) en relation avec la différence de niveau h entre O et AL . L'écoulement entraîne un ralentissement de la diminution du liquide AL , et si P n'est pas très élevée, un équilibre est atteint au-dessus du tube R_2 . Tout ceci conceptualise un exercice modéré d'intensité sous maximale avec production énergétique essentiellement par le métabolisme aérobie et qui peut donc durer très longtemps.

Si le robinet est largement ouvert (exercice intense), la situation initiale est comme décrit ci-dessus, mais le niveau de AL diminue sous le niveau du tube R_2 . C'est alors qu'une production de lactate commence et si l'exercice dure ou devient plus intense, le niveau de L diminue. Il peut y avoir état stable au niveau de R_2 : ce qui correspond à un exercice constant au seuil anaérobie accompagné de la composante lente de $\dot{V}O_2$ (due à une production énergétique en partie de la glycolyse anaérobie = écoulement à débit modéré à travers R_2). L'athlète arrive à épuisement lorsque L est vide et que le débit de liquide à travers R_1 n'est plus suffisant pour maintenir le débit de T ; c'est-à-dire lorsque l'athlète n'arrive plus à produire assez d'énergie pour maintenir cette intensité supra maximale. De la même manière, nous pouvons imaginer un exercice très intense (débit maximal à travers T) comme un sprint maximal sur quelques

secondes où le réservoir *AL* se vide sans que les deux autres réservoirs n'aient le temps de compenser cette baisse du niveau du liquide, l'intensité de cet exercice se voit donc obligatoirement diminué au bout de quelques secondes.

Si le robinet est maintenant fermé, c'est-à-dire que l'exercice s'arrête, *AL* commencera à se remplir à travers *R₁* et *R₂*, puis à travers *R₁* et *R₃* mais très lentement jusqu'à ce que *AL* retrouve son niveau de repos. Ce remplissage correspond au remboursement de la dette d'oxygène. Comme *R₃* est très étroit, *L* met beaucoup de temps pour se remplir, alors que *AL* est déjà remplie. Ainsi, le modèle prévoit que pendant un long moment après la fin de l'exercice, la $\dot{V}O_2$ ne revient pas à sa valeur de repos, mais reste légèrement au-dessus.

Le modèle hydraulique permet de modéliser le concept de « point de croisement des substrats » (crossover concept) établi par Brooks et Mercier (1994) à partir de l'utilisation respective des différents substrats énergétiques lorsque l'intensité de l'exercice augmente.

Présentés ainsi à travers deux concepts différents (courbe d'Howald et modèle hydraulique de Morton), les mécanismes bioénergétiques lors de l'exercice montrent qu'ils sont en partie responsable de la forme hyperbolique de la relation intensité - temps. Il convient également de souligner l'importance de la cinétique de $\dot{V}O_2$ dans les processus physiologiques qui ont lieu pendant l'effort pour bien comprendre ces concepts et la forme de la relation intensité – temps. En effet, la cinétique de $\dot{V}O_2$ correspond aux différentes phases de l'adaptation de l'apport d' O_2 de l'environnement aux muscles actifs en réponse aux besoins en ATP dans les tissus (Perrey et Candau, 2002). Selon l'intensité de l'effort, la mise en jeu des différentes voies métaboliques contrôlent les échanges gazeux au niveau tissulaire qui sont directement liés aux réponses métaboliques des muscles et qui s'apprécient à partir de la cinétique de $\dot{V}O_2$. Ainsi, l'analyse de cette cinétique, largement étudiée dans la littérature scientifique, informe des processus pulmonaires, circulatoires et métaboliques qui ont lieu lors de l'effort (Perrey et Candau, 2002).

1.2.4. Evaluation de l'endurance

La capacité d'endurance est reliée à la relation intensité – temps propre à chaque athlète. Selon Thibault (1988), une performance de longue durée dépend à la fois du débit de consommation maximale d'oxygène, de l'efficacité du geste et de l'endurance. Il caractérise l'endurance comme le déclin de la vitesse en fonction de plusieurs distances de course. Comme la vitesse maximale d'un athlète ne fait que diminuer au fur et à mesure que les distances des compétitions augmentent, la chute de vitesse plus ou moins prononcées (pente plus ou moins forte) traduit respectivement une endurance plus ou moins faible (Thibault, 2009). V. Billat (2003) définit « l'endurance athlétique » d'un sujet comme sa capacité à soutenir une vitesse donnée le plus longtemps possible (ou la capacité à développer la plus haute $P_{méca}$ possible sur un temps donné). Pour d'autres, l'endurance aérobie se définit comme la fraction ou le pourcentage de $\dot{V}O_{2max}$ (% $\dot{V}O_{2max}$) ou de PMA (%PMA) ou de VMA (%VMA) susceptible d'être maintenu au cours d'une épreuve d'une durée donnée (Lacour et Flandrois, 1977 ; Tokmakidis *et al.*, 1987 ; Bosquet *et al.*, 2002). L'endurance est ainsi définie différemment selon les auteurs, c'est pourquoi il existe d'autant plus de méthodes d'évaluation à partir de l'analyse de la relation intensité – temps propre à chaque athlète.

Le premier indice ayant pour objectif de mesurer l'endurance est l'œuvre d'Henry et Farmer (1949) qui ont calculé un indice (« dropp-off index ») à partir de la différence de temps entre deux distances différentes (70 et 300 yards).

Un peu plus tard, Lietzke (1954) proposa une équation pour représenter la relation distance (en logarithme) – temps (en logarithme) avec une constante appelée « constante d'épuisement ». Cette valeur représentait une quantification de la résistance à la fatigue, c'est-à-dire de l'endurance.

Frederick a beaucoup étudié le concept d'endurance entre 1959 et 1977. Il a proposé un « coefficient de fatigue » pour quantifier la diminution de la vitesse en fonction du temps à partir d'une régression linéaire entre l'allure de course et le logarithme de la distance (Frederick, 1977). Il classait ensuite les athlètes (sur 1500 m, 5000 m, 10000 m et marathon) à partir de la valeur de ce coefficient. Il ne chercha pas réellement à l'expliquer, précisant juste qu'il dépendait de facteurs psychologiques, physiologiques et morphologiques.

Harman (1987) a étudié cette qualité d'endurance chez des cyclistes. Il a proposé un index d'endurance à partir de la relation temps – puissance en pourcentage de la puissance maximale sur une seconde. En effet, il a observé qu'en puissance relative les courbes étaient superposables alors qu'en puissance absolue, il était impossible de les comparer. Son équation

intègre un facteur F capable d'évaluer la capacité d'endurance d'un athlète à partir d'une comparaison avec la moyenne du groupe.

En reprenant la définition de Billat (2003), le concept d'endurance s'apparente à celui de t_{lim} . En effet, de nombreuses études ont porté sur le t_{lim} à un certain pourcentage de $\dot{V}O_{2max}$ pour évaluer les qualités d'endurance, notamment Coyle (1991) sur des épreuves de temps limite à 80% de $\dot{V}O_{2max}$ chez des cyclistes. Il a également montré que le seuil anaérobie était corrélé au temps limite à 80% de $\dot{V}O_{2max}$.

Selon la classification de Bosquet *et al.* (2002), l'analyse des différents seuils (ventilatoire et lactique) lors d'épreuves d'effort triangulaires serait une méthode de mesure indirecte de l'endurance. Concernant les méthodes de mesure directe de l'endurance, il en recense un certain nombre.

Tout d'abord, les épreuves de temps limite à un pourcentage de $\dot{V}O_{2max}$ comme précédemment cités. La P_{crit} , définie par Monod et Scherrer comme une intensité qu'il est possible de maintenir indéfiniment, s'apparente également comme un indice de l'endurance (1960). Cependant, sa méthode de détermination reste assez complexe et difficile pour un athlète.

Le modèle de Gimenez d'exercice en créneau s'apparente comme une méthode de mesure directe de l'endurance (Gimenez *et al.*, 1982). Le principe repose sur la succession pendant 45 min, de 4 min à intensité de base (50% de la PMA) et 1 min à intensité pic (100% PMA) soit, 9 répétitions. Le protocole d'évaluation consiste à répéter l'exercice plusieurs fois en augmentant le niveau de base de 5% après chaque essai réussi (50% puis 55% puis 60%...) jusqu'à définir l'intensité maximale de base avec laquelle le sujet arrive à terminer les 45' d'exercice. On calcule ensuite le rapport base - pic le plus élevé que le sujet a pu tenir pour obtenir un indice d'endurance aérobie. Les auteurs ont expérimenté ce protocole sur cycloergomètre alors que Prédine *et al.* (1989) l'ont réalisé sur une population d'enfants en course à pied.

Bosquet *et al.* (2002) ont repris les nombreuses analyses d'évolution de la fraction d'utilisation du débit de consommation maximale d'oxygène avec le temps. Les aspects curvilinéaire de la relation entre le $\%VO_{2max}$ et la durée de l'exercice sont attribués à Costill et Fox (1969) et à Astrand et Rodhal (1970). Cette curvilinéarité est observable pour des durées inférieures ou égales à 30 min, au-delà cette relation devient linéaire.

On référence de nombreuses modélisations de la décroissance de %VO_{2max} utilisée suivant le temps d'exercice.

Di Prampero (1986) a étudié cette relation et il a établi 3 équations différentes selon le niveau et le sexe :

$$- \text{ Coureurs amateurs : } \%_{\text{VO}_{2\text{max}}} = 0,905 - 0,00091 \cdot t \quad (7)$$

$$- \text{ Athlètes féminines : } \%_{\text{VO}_{2\text{max}}} = 1,00 - 0,050 \cdot \log (0,14 \cdot t) \quad (8)$$

$$- \text{ Athlètes masculins : } \%_{\text{VO}_{2\text{max}}} = 1,00 - 0,056 \cdot \log (0,14 \cdot t) \quad (9)$$

(Avec t : durée d'exercice)

Saltin (1973) a également modélisé cette relation avec une équation différente, pour des durées comprises entre 30 et 300 min :

$$- \%_{\text{VO}_{2\text{max}}} = 0,940 - 0,001 \cdot t \quad (10)$$

Si l'on reprend les travaux de Léger, Mercier et Gauvin (1986), ils ont proposé quatre équations suivant l'intervalle de temps dans lequel était compris l'exercice :

$$- \text{ Si } t < 4.6 \text{ min : } \log \%_{\text{VO}_{2\text{max}}} = 4.93 - 0.186 \log t \quad (11)$$

$$- \text{ Si } 4.6 < t < 70.4 \text{ min : } \log \%_{\text{VO}_{2\text{max}}} = 4.79 - 0.096 \log t \quad (12)$$

$$- \text{ Si } 70.4 < t < 173.7 \text{ min : } \log \%_{\text{VO}_{2\text{max}}} = 4.90 - 0.121 \log t \quad (13)$$

$$- \text{ Si } t > 173.7 \text{ min : } \log \%_{\text{VO}_{2\text{max}}} = 5.08 - 0.156 \log t \quad (14)$$

Ils ont également proposé une autre équation standard :

$$- \%_{\text{VO}_{2\text{max}}} = 126.69 - 11.056 \log t \quad (15)$$

Tout comme Montmayer et Villaret (1990) en ont modélisé une :

$$- \%_{\text{VO}_{2\text{max}}} = 109.837 \log t^{-0.202} \quad (16)$$

La figure 9 recense toutes ces modélisations, afin de les comparer une à une ; certains modélisant une fonction linéaire, d'autre une fonction logarithmique curvilinéaire. On note de grandes différences entre les modèles. Par exemple, pour un exercice de 100 min, un athlète masculin pourrait soutenir 87% de sa $\dot{V}O_{2\text{max}}$ selon Di Prampero, alors que Léger prédirait une fraction de 77%...

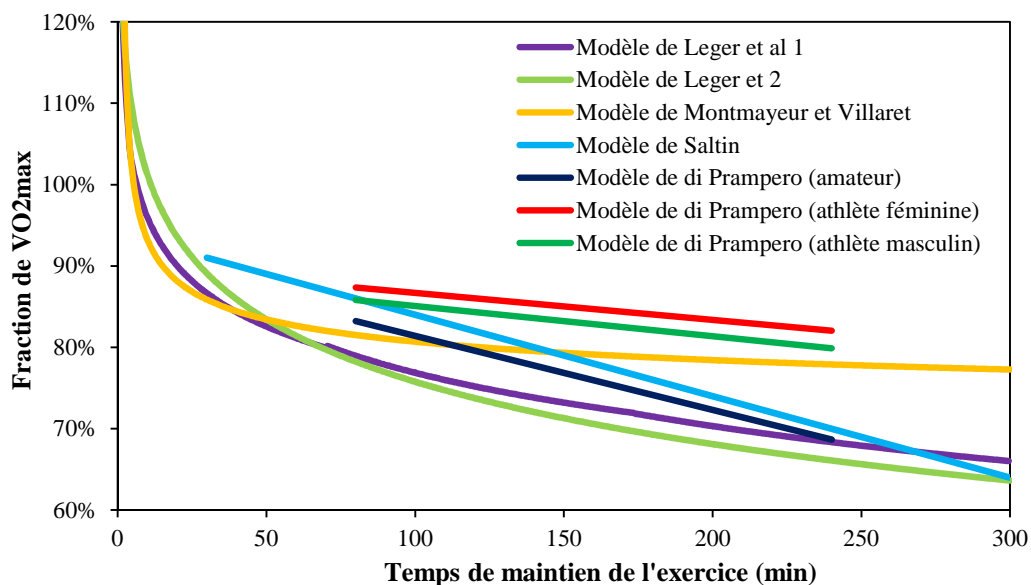


Figure 9 Comparaison des différentes modélisations d'évolution de la fraction de $\dot{V}O_{2max}$ soutenue selon le temps d'exercice (d'après les données de Léger et al. (1986), de Montmayer et Villaret (1990), de Saltin (1973) et de di Prampero (1986))

Enfin, le modèle le plus connu est celui de Peronnet et Thibault qui ont défini un indice d'endurance (IE) correspondant à la pente de la relation entre le $\%VO_{2max}$ et le temps d'exercice (Peronnet *et al.*, 1984 ; Peronnet et Thibault, 1987 ; Tokmakidis *et al.*, 1987 ; Peronnet *et al.*, 1989). En effet, alors que les modèles précédemment étudiés sont censés calculer le $\%VO_{2max}$ sur un temps donné à partir de la $\dot{V}O_{2max}$ de l'athlète, le modèle de Peronnet et Thibault donne une valeur de l'endurance à partir de plusieurs performances établies sur le terrain. Ce qui est doublement intéressant avec ce modèle c'est qu'il est possible de calculer l'IE à partir du temps de maintien d'un pourcentage de la vitesse maximale aérobie (aérobie), c'est-à-dire en basculant sur la relation vitesse – temps. A partir de ce modèle, les auteurs affirment être capables d'évaluer l'endurance d'un sujet. Selon Thibault, l'endurance se caractérise par le déclin de la vitesse en fonction de plusieurs distances de course. La chute de vitesse plus ou moins prononcées traduit une endurance plus ou moins faible. Il quantifie cette décroissance par la relation linéaire qui lie le logarithme de la durée de l'effort et l'intensité exprimée en $\%VO_{2max}$. La pente de cette régression correspond à un indice de la capacité d'endurance où plus l'indice est élevé, meilleure est l'endurance de l'athlète (figure 10).

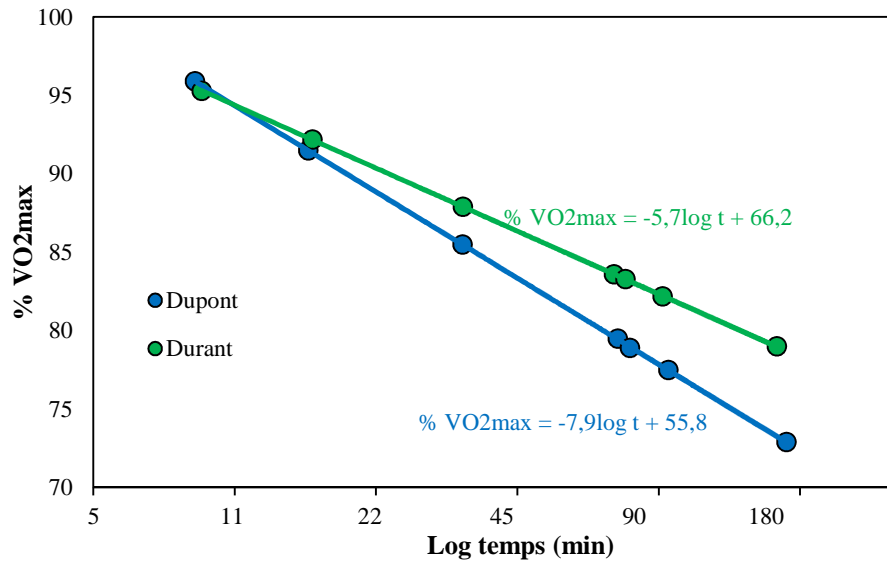


Figure 10 Illustration graphique et mathématique de l'évaluation de l'indice d'endurance de deux athlètes (Durant et Dupont) à partir de plusieurs performances réalisées en course à pied dont les % $\dot{V}O_{2max}$ équivalents ont été estimés. Dans cet exemple, Durant a une capacité d'endurance plus élevée (IE : -5,7) que Dupont (IE : -7,9) (adapté de Peronnet et Thibault, 1984).

Cazorla (2001) a beaucoup étudié la relation entre l'endurance et la Vitesse Maximale Aérobie (VMA). Il en ressort les mêmes constats qu'avec la $\dot{V}O_{2max}$: il existe une curvilinéarité de la relation %VMA - temps de l'exercice entre 7 et 30 min, et une linéarité pour les efforts plus longs (figure 11).

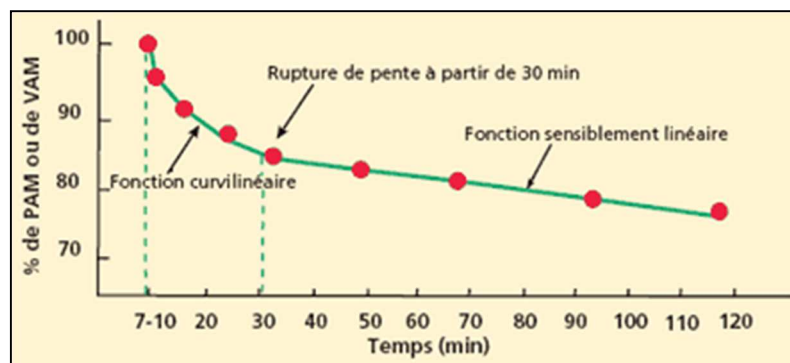


Figure 11 Décroissance de la durée limite maintenue en fonction du % v_{MA} utilisée (Cazorla, 2001)

Il a également mis au point une méthode évaluant l'endurance aérobie d'un sportif en reprenant le même principe que celui énoncé par Peronnet et Thibault, mais en le simplifiant, de façon à pouvoir l'utiliser avec des scolaires. La méthode consistait à évaluer la VMA et à enregistrer une performance (sur une distance) sur un temps donné. Un indice d'endurance aérobie était ensuite calculé en %VMA à partir du rapport entre la distance parcourue et la

distance théorique à VMA sur le même temps de course. Le rapport entre la vitesse moyenne et la distance théorique à VMA pouvait également être calculé.

Une dernière méthode indirecte d'évaluation de l'endurance consiste à utiliser le nomogramme (figure 12) de Mercier et *al.* (1984). Il permet de prédire l'endurance à partir de plusieurs performances réalisées en course à pied, ainsi que la $\dot{V}O_{2\max}$ comme l'ont également montré Tokmakidis et *al.* (1987). C'est notamment à l'aide de ce nomogramme que Mercier défend l'idée intéressante selon laquelle un bon dosage des intensités et des durées des entraînements n'est rationnel qu'après une analyse de l'intégralité de la courbe de performance et non pas uniquement à partir de la valeur de la VMA.

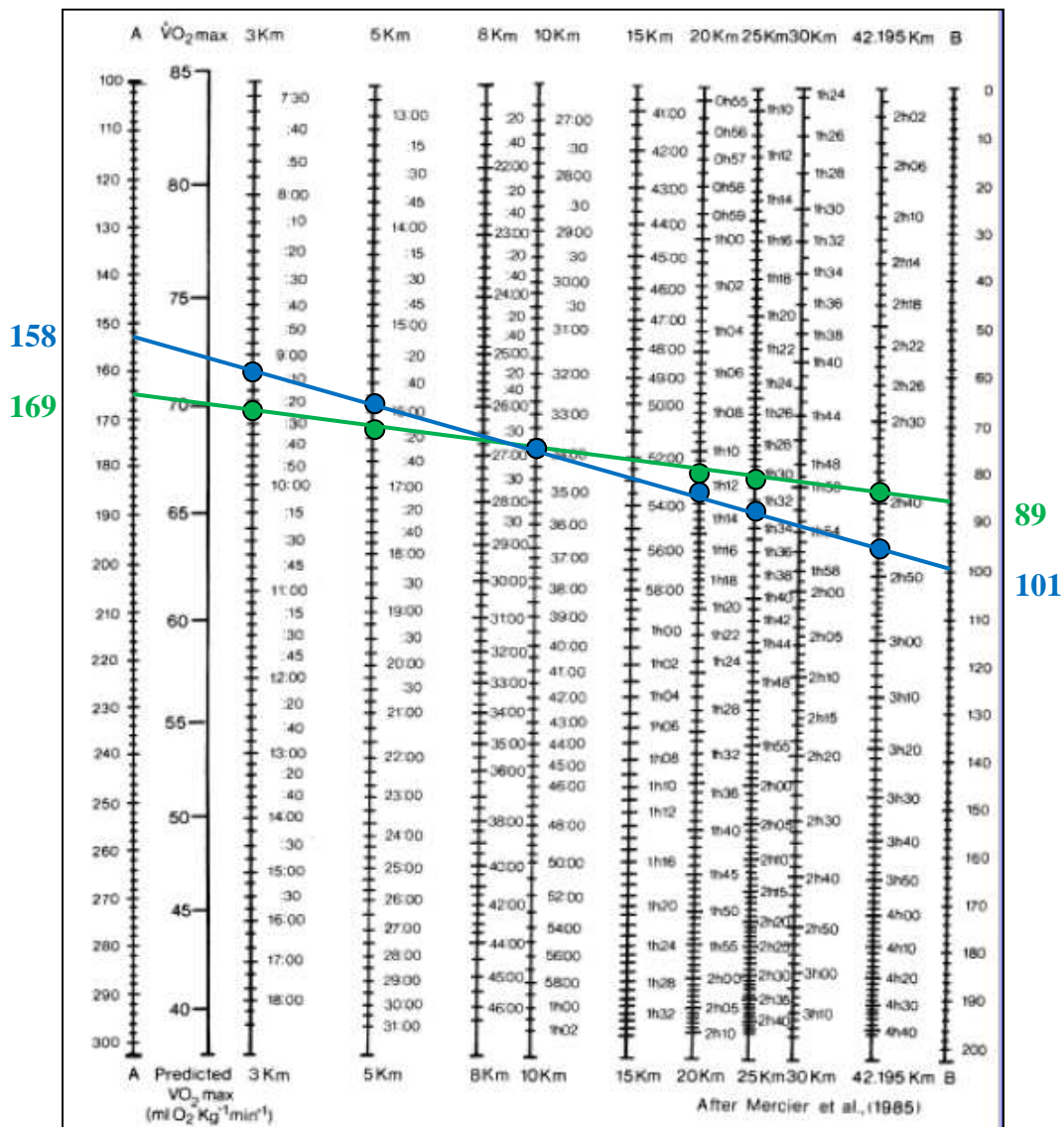


Figure 12 Nomogramme de Mercier et *al.* (1984). Exemple de calcul de l'IE de Dupont (bleu) et Durant (vert) à partir de performances réalisées en course à pied (IE = indice A – indice B). Durant a une capacité d'endurance plus élevée (IE : 169-89=80) que Dupont (158-101=57). Exemple d'après les mêmes données que dans la figure 11 (Peronnet et Thibault, 1984).

De nombreux modèles permettant de calculer un indice d'endurance sont ainsi disponibles avec leurs avantages et leurs limites. Le plus souvent utilisé est celui de Peronnet et Thibault, bien que sa principale contrainte soit de fixer le t_{lim} de maintien à $\dot{V}O_{2max}$ pour tous les athlètes à 7 min. En effet, la littérature scientifique rapporte que le T_{lim} à $\dot{V}O_{2max}$ pourrait être compris entre 3 et 11 min selon les athlètes, le sport pratiqué et le protocole d'évaluation de la $\dot{V}O_{2max}$ (Billat *et al.*, 1996 ; Faina *et al.*, 1997 ; Bosquet *et al.*, 2002 ; Billat, 2003).

2. Applications de la relation intensité – temps dans le cyclisme

2.1. Relation intensité – temps en cyclisme

La relation intensité - temps a largement été étudiée en cyclisme. Les premières observations datent de Kennelly (1906) qui font état de la détermination de la relation vitesse - temps à bicyclette, notamment afin de comparer la pente de cette relation en fonction du type de locomotion : marche, patinage, aviron, cyclisme... En revanche, par la suite on dénombre un nombre plus restreint d'études s'intéressant au cyclisme qu'à la course à la pied. En effet, la standardisation des conditions en cyclisme afin d'obtenir des relations vitesse – temps valides est compliquée puisque ce sport se déroule sur tout type de terrain en conditions extérieures. C'est la raison pour laquelle, on retrouve surtout des études portées sur l'analyse de la relation vitesse – temps en cyclisme sur piste. Par exemple, Frederick (1959) a établi la relation entre la distance et le t_{lim} à partir des records du monde de l'époque (Bocquet et Billat, 1999).

Toujours à partir des performances réalisées en cyclisme sur piste, Ettema (1966) a poursuivi les travaux de Monod et Scherrer sur la P_{crit} d'un exercice au niveau local en les élargissant à différents sports. Il a défini la notion de vitesse critique à partir de l'étude des records du monde de 1965. La vitesse critique était définie comme la vitesse proche de l'état stable qu'il est possible de tenir sur un temps prolongé.

Ce n'est que lorsque la $P_{méca}$ a pu être mesurée sur bicyclette ergométrique, que les scientifiques ont commencé à étudier la relation $P_{méca}$ – temps lors du pédalage. Harman (1987) a évalué l'endurance de cyclistes à l'aide d'un index provenant de la relation temps – puissance relative de l'exercice en pourcentage de la $P_{méca}$ maximale ($P_{méca}$ maximum sur 1 sec, P_{max}) (figure 13).

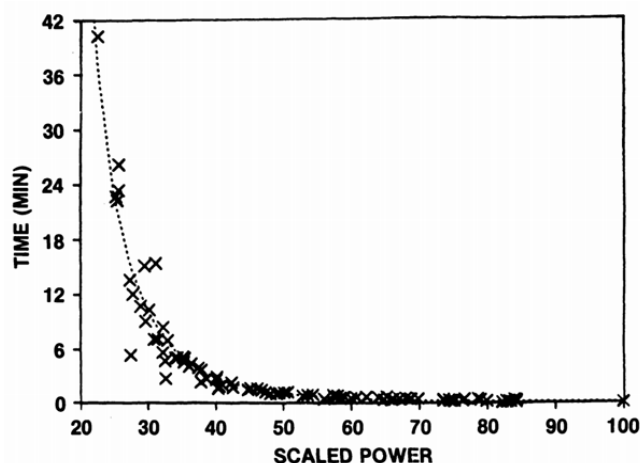


Figure 13 Modélisation de la relation temps – $\%P_{max}$ obtenue à partir d'essais en laboratoire avec des cyclistes (Harman et al., 1987)

Coggan a démocratisé la relation $P_{\text{méca}}$ – temps en cyclisme à travers le concept de « power profiling » (Allen et Coggan, 2010) qui permet d'établir une classification des cyclistes. A partir d'un grand échantillon de sujets, il a proposé une échelle permettant de classer les cyclistes dans différentes catégories de niveau (tableau 1). Il a choisi différentes durées d'effort cible pour évaluer selon lui les aptitudes principales d'un cycliste à savoir : 1) la puissance du système neuromusculaire (5 sec), 2) la capacité anaérobie (1 min), 3) la PMA (5 min) et 4) le seuil anaérobie (60 min). Cette échelle de niveau catégorise le niveau des aptitudes des cyclistes en 8 niveaux, de la classe mondiale au non entraîné, à partir de la $P_{\text{méca}}$ maximale maintenue sur les différentes durées d'exercice qu'il a défini. Ainsi, le « power profiling » a pour objectif de déterminer à partir d'un protocole de test unique, réalisable en laboratoire ou sur le terrain, les points faibles et les points forts d'un cycliste en ciblant l'évaluation sur ces quatre aptitudes physiques spécifiques au cyclisme. Il n'a pas pour vocation première d'établir un suivi des $P_{\text{méca}}$ dans le temps à partir de données de terrain. Le choix des différentes durées d'effort pour caractériser le niveau de chacune des aptitudes physiques est critiquable et peut être amélioré pour refléter plus fidèlement les différentes capacités physiques maximales. Par exemple, la puissance du système neuromusculaire et du métabolisme anaérobie lactique pourrait être évaluée sur des durées plus courtes. A travers cette méthodologie, il considère également le temps de maintien de la PMA (t_{PMA}) comme équivalent entre les cyclistes puisqu'il l'évalue à partir de la $P_{\text{méca}}$ maximale réalisée sur 5 min. De plus, l'évaluation du seuil anaérobie défini par Coggan comme le « Functional Threshold Power », c'est-à-dire la $P_{\text{méca}}$ maximale d'un athlète sur 1 h, possède également certaines limites. En effet, le « Functional Threshold Power » s'obtient à partir d'une mesure indirecte puisqu'il est calculé comme étant 95% de la $P_{\text{méca}}$ maximale d'un test 20 minutes. Partant de ce principe, il considère donc équivalente la capacité d'endurance aérobie entre les cyclistes.

Le tableau 1 montre deux exemples différents. Le cycliste 1 possède un niveau qualifié d'excellent dans l'aptitude reliée au seuil anaérobie alors que plus l'effort est court, moins son niveau est performant. Ce profil correspond à un spécialiste de l'effort CLM. A l'inverse, la cycliste 2 renvoie à un profil de sprinteuse puisqu'elle possède un niveau exceptionnel lors d'un effort maximal sur 5 sec et que son niveau de performance diminue avec la durée de l'exercice. Ce tableau permet de définir le profil des cyclistes (sprinteur, puncheur, rouleur, grimpeur...) en fonction de la relation $P_{\text{méca}}$ – temps en les hiérarchisant.

Tableau 1 Tableau de Coggan classifiant le niveau d'un coureur en fonction de la relation $P_{méca} - \text{temps}$ (en rouge : cas du cycliste 1, en vert : cas du cycliste 2) (données non publiées, trainingpeaks.com/articles/cycling/power-profiling.aspx)

| | | Maximal power output (in W/kg) | | | | | | | |
|---|-------|--------------------------------|----------|----------|----------|-------|-------|-------|------|
| | | Men | | | | Women | | | |
| | | 00:00:05 | 00:01:00 | 00:05:00 | 00:30:00 | 5 s | 1 min | 5 min | FT |
| World class (e.q., international pro) | | 24,04 | 11,50 | 7,60 | 6,40 | 19,42 | 9,29 | 6,61 | 5,69 |
| | | 23,77 | 11,39 | 7,50 | 6,31 | 19,20 | 9,20 | 6,52 | 5,61 |
| | | 23,50 | 11,27 | 7,39 | 6,22 | 18,99 | 9,11 | 6,42 | 5,53 |
| | | 23,22 | 11,16 | 7,29 | 6,13 | 18,77 | 9,02 | 6,33 | 5,44 |
| | | 22,95 | 11,04 | 7,19 | 6,04 | 18,56 | 8,93 | 6,24 | 5,36 |
| | | 22,68 | 10,93 | 7,08 | 5,96 | 18,34 | 8,84 | 6,15 | 5,28 |
| | | 22,41 | 10,81 | 6,98 | 5,87 | 18,13 | 8,75 | 6,05 | 5,20 |
| | | 22,14 | 10,70 | 6,88 | 5,78 | 17,91 | 8,66 | 5,96 | 5,12 |
| | | 21,86 | 10,58 | 6,77 | 5,69 | 17,70 | 8,56 | 5,87 | 5,03 |
| | | 21,59 | 10,47 | 6,67 | 5,60 | 17,48 | 8,47 | 5,78 | 4,95 |
| Exceptional (e.q., domestic pro) | | 21,32 | 10,35 | 6,57 | 5,51 | 17,26 | 8,38 | 5,68 | 4,87 |
| | | 21,05 | 10,24 | 6,46 | 5,42 | 17,05 | 8,29 | 5,59 | 4,79 |
| | | 20,78 | 10,12 | 6,36 | 5,33 | 16,83 | 8,20 | 5,50 | 4,70 |
| | | 20,51 | 10,01 | 6,26 | 5,24 | 16,62 | 8,11 | 5,41 | 4,62 |
| | | 20,23 | 9,89 | 6,15 | 5,15 | 16,40 | 8,02 | 5,31 | 4,54 |
| | | 19,96 | 9,78 | 6,05 | 5,07 | 16,19 | 7,93 | 5,22 | 4,46 |
| Excellent (e.q., cat. 1) | | 19,69 | 9,66 | 5,95 | 4,98 | 15,97 | 7,84 | 5,13 | 4,38 |
| | | 19,42 | 9,55 | 5,84 | 4,89 | 15,76 | 7,75 | 5,04 | 4,29 |
| | | 19,15 | 9,43 | 5,74 | 4,80 | 15,54 | 7,66 | 4,94 | 4,21 |
| | | 18,87 | 9,32 | 5,64 | 4,71 | 15,32 | 7,57 | 4,85 | 4,13 |
| Very good (e.q., cat. 2) | | 18,60 | 9,20 | 5,53 | 4,62 | 15,11 | 7,48 | 4,76 | 4,05 |
| | | 18,33 | 9,09 | 5,43 | 4,53 | 14,89 | 7,39 | 4,67 | 3,97 |
| | | 18,06 | 8,97 | 5,33 | 4,44 | 14,68 | 7,30 | 4,57 | 3,88 |
| | | 17,79 | 8,86 | 5,22 | 4,35 | 14,46 | 7,21 | 4,48 | 3,80 |
| | | 17,51 | 8,74 | 5,12 | 4,27 | 14,25 | 7,11 | 4,39 | 3,72 |
| Good (e.q., cat. 3) | | 17,24 | 8,63 | 5,01 | 4,18 | 14,03 | 7,02 | 4,30 | 3,64 |
| | | 16,97 | 8,51 | 4,91 | 4,09 | 13,82 | 6,93 | 4,20 | 3,55 |
| | | 16,70 | 8,40 | 4,81 | 4,00 | 13,60 | 6,84 | 4,11 | 3,47 |
| | | 16,43 | 8,28 | 4,70 | 3,91 | 13,39 | 6,75 | 4,02 | 3,39 |
| | | 16,15 | 8,17 | 4,60 | 3,82 | 13,17 | 6,66 | 3,93 | 3,31 |
| | | 15,88 | 8,05 | 4,50 | 3,73 | 12,95 | 6,57 | 3,83 | 3,23 |
| | | 15,61 | 7,94 | 4,39 | 3,64 | 12,74 | 6,48 | 3,74 | 3,14 |
| | | 15,34 | 7,82 | 4,29 | 3,55 | 12,52 | 6,39 | 3,65 | 3,06 |
| | | 15,07 | 7,71 | 4,19 | 3,47 | 12,31 | 6,30 | 3,56 | 2,98 |
| | | 14,79 | 7,59 | 4,08 | 3,38 | 12,09 | 6,21 | 3,46 | 2,90 |
| Moderate (e.q., cat. 4) | | 14,52 | 7,48 | 3,98 | 3,29 | 11,88 | 6,12 | 3,37 | 2,82 |
| | | 14,25 | 7,36 | 3,88 | 3,20 | 11,66 | 6,03 | 3,28 | 2,73 |
| | | 13,98 | 7,25 | 3,77 | 3,11 | 11,45 | 5,94 | 3,19 | 2,65 |
| | | 13,71 | 7,13 | 3,67 | 3,02 | 11,23 | 5,85 | 3,09 | 2,57 |
| | | 13,44 | 7,02 | 3,57 | 2,93 | 11,01 | 5,76 | 3,00 | 2,49 |
| Fair (e.q., cat. 5) | | 13,16 | 6,90 | 3,46 | 2,84 | 10,80 | 5,66 | 2,91 | 2,40 |
| | | 12,89 | 6,79 | 3,36 | 2,75 | 10,58 | 5,57 | 2,82 | 2,32 |
| | | 12,62 | 6,67 | 3,26 | 2,66 | 10,37 | 5,48 | 2,72 | 2,24 |
| | | 12,35 | 6,56 | 3,15 | 2,58 | 10,15 | 5,39 | 2,63 | 2,16 |
| | | 12,08 | 6,44 | 3,05 | 2,49 | 9,94 | 5,30 | 2,54 | 2,08 |
| Untrained (e.q., non-racer) | | 11,80 | 6,33 | 2,95 | 2,40 | 9,72 | 5,21 | 2,45 | 1,99 |
| | | 11,53 | 6,21 | 2,84 | 2,31 | 9,51 | 5,12 | 2,35 | 1,91 |
| | | 11,26 | 6,10 | 2,74 | 2,22 | 9,29 | 5,03 | 2,26 | 1,83 |
| | | 10,99 | 5,99 | 2,64 | 2,13 | 9,07 | 4,94 | 2,17 | 1,75 |
| | | 10,72 | 5,87 | 2,53 | 2,04 | 8,86 | 4,85 | 2,07 | 1,67 |
| | 10,44 | 5,76 | 2,43 | 1,95 | 8,64 | 4,76 | 1,98 | 1,58 | |
| | 10,17 | 5,64 | 2,33 | 1,86 | 8,43 | 4,67 | 1,89 | 1,50 | |

La figure 14 reprend le tableau de Coggan en traçant la relation $P_{méca} - \text{temps}$ de chacune des catégories de niveaux. On retrouve bien la forme hyperbolique de la relation liant la $P_{méca}$ maximale maintenue avec la durée de l'exercice, conforme à tous les travaux décrits précédemment. On note un grand écart de $P_{méca}$ selon le niveau. Par exemple, pour le pic de $P_{méca}$ maximale sur 5 min, la limite supérieure d'un cycliste de niveau mondial est de 7,6 W/kg alors que celle d'un cycliste non entraîné est de 3,05 W/kg. Cela correspond à une différence d'environ 320 W pour deux sujets de 70 kg (niveau mondial 532 W pour 70kg contre 213 W au niveau non entraîné).

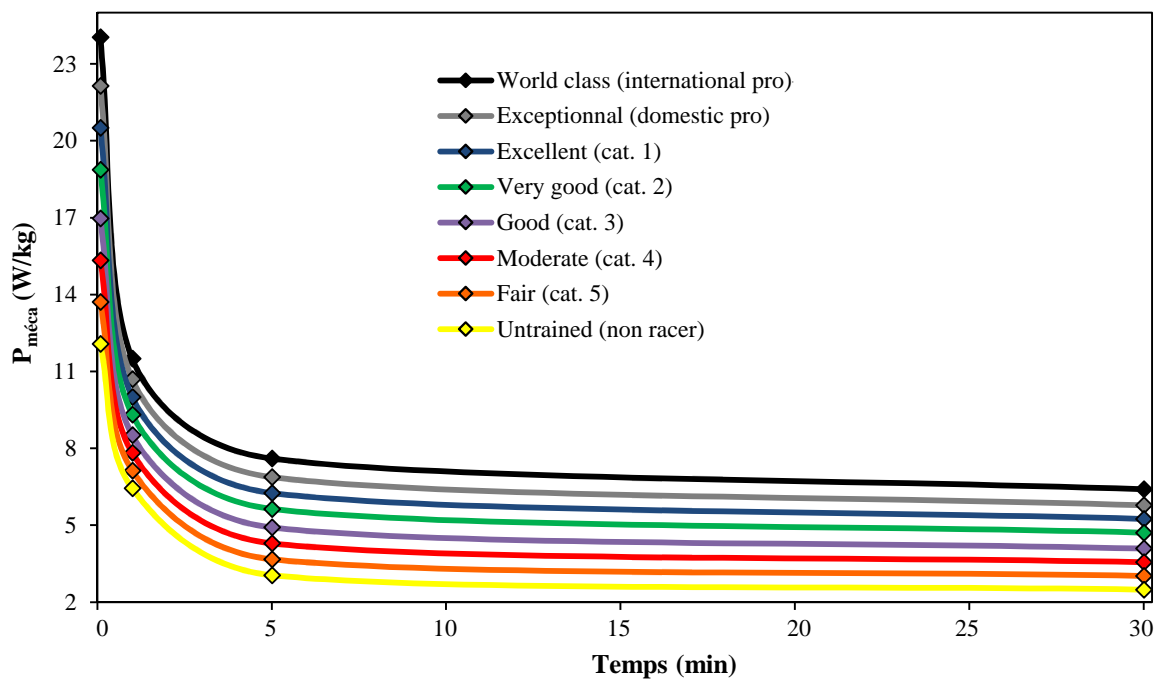


Figure 14 Relation $P_{méca}$ - temps adaptée à partir du tableau de Coggan (pour des athlètes masculins) (Allen et Coggan, 2010)

Depuis l'apparition des capteurs de puissance mobiles plusieurs études se sont intéressées à la répartition de la $P_{méca}$ des cyclistes en compétition (course d'un jour et course par étapes) afin d'analyser la charge de travail et le profil physiologique des cyclistes (Ebert *et al.*, 2005 ; Ebert *et al.*, 2006 ; Vogt *et al.*, 2006 ; Vogt *et al.*, 2007 ; Vogt *et al.*, 2007 ; Vogt *et al.*, 2008 ; Quod *et al.*, 2010 ; Menaspà *et al.*, 2013). Il convient de souligner qu'aucune de ces premières études ne s'est intéressée à évaluer le potentiel physique maximal d'un cycliste à partir de ces données de terrain au-delà de la durée d'une compétition.

Quod *et al.* (2010) ont comparé chez des cyclistes professionnels les $P_{méca}$ maximales produites lors de tests de différentes durées (5, 15, 30, 60, 240 et 600 sec) en laboratoire et celles générées en compétition sur ces mêmes durées. Ils ont ainsi pu déterminer également la P_{crit} . Ils n'ont rapporté aucune différence significative entre les $P_{méca}$ maximales mesurées en compétition et celles obtenues lors des tests maximaux en laboratoire. Le résultat était identique avec P_{crit} . Cette étude a montré qu'il était rationnel et valide d'utiliser les données de $P_{méca}$ mesurées sur le terrain en compétition pour évaluer et suivre l'évolution du potentiel physique des cyclistes. En revanche, il demande à être vérifié que chacun des athlètes de la population testée ait véritablement exprimé le maximum de son potentiel en compétition sur une période d'observation si courte.

Parmi les études relevant des $P_{\text{méca}}$ obtenues sur des compétitions de haut niveau, plusieurs d'entre elles rapportent des valeurs de $P_{\text{méca}}$ maximales sur différents intervalles de temps (tableau 2) (Vogt *et al.*, 2007 ; Vogt *et al.*, 2007 ; Vogt *et al.*, 2008).

Tableau 2 Pics de puissance maximales sur différents intervalles de temps d'un groupe de cyclistes lors du Tour de France (Vogt *et al.*, 2007)

| | | MMP 15 | MMP 30 | MMP 60 | MMP 120 | MMP 180 | MMP 240 | MMP 300 | MMP 1800 |
|------------------|--------|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Flat | (W) | 895 ^{a,b} | 775 ^{a,b} | 657 ^{a,b} | 549 ^{a,b} | 481 ^{a,b} | 457 ^{a,b} | 435 ^{a,b} | 342 ^{a,b} |
| | (W) | (710–1179) | (627–1115) | (525–1035) | (429–807) | (385–690) | (365–652) | (354–560) | (281–386) |
| | (W/kg) | 13.0 ^{a,b} | 11.5 ^{a,b} | 9.7 ^{a,b} | 8.2 ^{a,b} | 7.1 ^{a,b} | 6.8 ^{a,b} | 6.6 ^{a,b} | 4.8 ^{a,b} |
| | (W/kg) | (9.7–19.7) | (8.6–18.6) | (7.1–17.3) | (6.6–13.5) | (6.1–11.5) | (5.6–10.9) | (5.6–9.3) | (4.2–5.6) |
| Semi-mountainous | (W) | 1029 ^b | 801 ^b | 650 ^b | 557 ^b | 526 ^b | 505 ^b | 491 ^b | 389 |
| | (W) | 852–1338 | 685–960 | 611–692 | 553–577 | 497–564 | 474–542 | 454–533 | 349–427 |
| | (W/kg) | 14.9 ^b | 11.4 ^b | 9.0 ^b | 8.0 ^b | 7.7 ^b | 7.1 ^b | 6.9 ^b | 5.4 |
| | (W/kg) | (13.1–17.8) | (10.7–12.8) | (8.6–9.5) | (7.8–8.5) | (7.3–8.0) | (6.7–7.5) | (6.5–7.4) | (5.1–6.0) |
| Mountain | (W) | 836 | 666 | 557 | 497 | 489 | 466 | 459 | 394 |
| | (W) | (710–1047) | (605–750) | (508–658) | (483–524) | (470–491) | (457–476) | (443–475) | (335–427) |
| | (W/kg) | 12.6 | 10.0 | 8.2 | 7.3 | 7.2 | 6.9 | 6.7 | 5.6 |
| | (W/kg) | (10.7–16.4) | (8.9–11.2) | (7.1–9.4) | (6.6–7.7) | (6.4–7.5) | (6.2–7.3) | (6.1–7.2) | (5.0–6.1) |

L'étude d'Ebert *et al.* (2006) montre la relation $P_{\text{méca}}$ – temps obtenue en fonction du profil des étapes (figure 15). Les résultats permettent d'établir une relation $P_{\text{méca}}$ – temps particulière en fonction du type de terrain (plat, moyenne montagne, montagne) et du profil des coureurs (sprinteur, grimpeur...). La figure 15 illustre bien ces changements. En effet, on observe que les $P_{\text{méca}}$ sur des efforts courts sont plus élevées sur les étapes plates, ce qui traduit les nombreux changements de rythme et relances sur ce type de parcours. Alors que lors des étapes montagneuses, les $P_{\text{méca}}$ sur des efforts plus longs sont supérieures étant donné que le niveau de $P_{\text{méca}}$ est plus important et constant dans les cols.

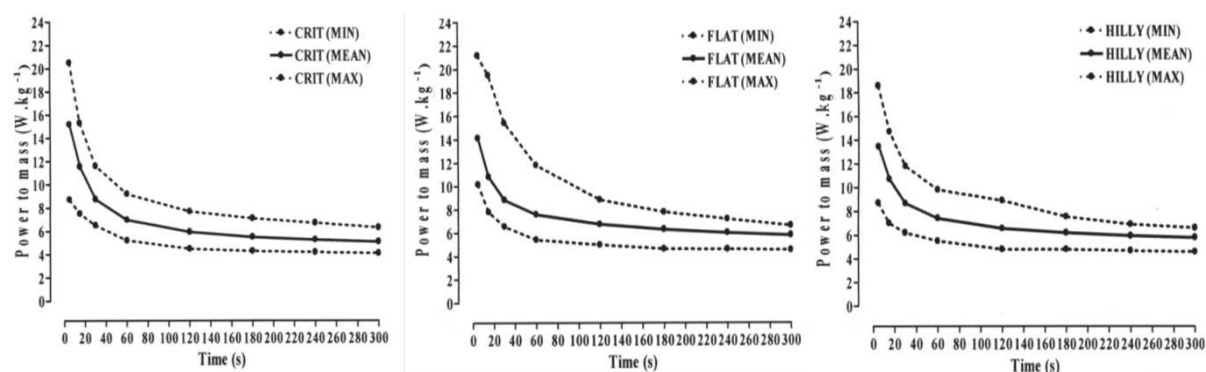


Figure 15 Relations $P_{\text{méca}}$ – temps pour des critères (CRIT), étapes plates (FLAT) et étapes montagneuses (HILLY) d'une course à étapes (Ebert *et al.*, 2006)

L'étude de Vogt *et al.* (2007) a mesuré les $P_{m\acute{e}ca}$ lors d'un Tour d'Italie sur un seul cycliste. Les données de $P_{m\acute{e}ca}$ maximales en fonction de différents intervalles de temps sont présentées dans le tableau 3.

Tableau 3 Pics de $P_{m\acute{e}ca}$ maximale sur différents intervalles de temps (15, 30, 60, 120, 180, 240, 300 et 1800 sec) d'un cycliste relevés sur un Tour d'Italie (Vogt *et al.*, 2007)

| Type of stage | Stage | MMP 15 | MMP 30 | MMP 60 | MMP 120 | MMP 180 | MMP 240 | MMP 300 | MMP 1800 |
|---------------|-------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|----------|
| Flat | 10 | 660 | 585 | 485 | 454 | 414 | 388 | 379 | 279 |
| | 12 | 668 | 505 | 434 | 329 | 326 | 317 | 308 | 275 |
| | 15 | 523 | 434 | 407 | 343 | 343 | 305 | 280 | 179 |
| | 16 | 416 | 353 | 302 | 277 | 269 | 263 | 252 | 199 |
| | 20 | 692 | 566 | 441 | 388 | 375 | 365 | 329 | 261 |
| Mountain | 11 | 651 | 584 | 475 | 450 | 444 | 432 | 429 | 373 |
| | 13 | 680 | 577 | 531 | 461 | 448 | 441 | 438 | 389 |
| | 14 | 662 | 620 | 547 | 481 | 460 | 448 | 447 | 370 |
| | 19 | 519 | 476 | 461 | 446 | 434 | 419 | 410 | 336 |

La figure 16 présente la relation $P_{m\acute{e}ca}$ – temps obtenue (en rouge) avec en pointillés les différents niveaux de performance déterminés par Coggan (Allen et Coggan, 2010). Le profil du cycliste s'apparente à celui d'un grimpeur. En effet, ses $P_{m\acute{e}ca}$ sur des intervalles de temps courts correspondent à un faible niveau. On peut supposer qu'il n'a certainement pas produit d'efforts au maximum de ses possibilités sur ces durées. En revanche, pour le record de $P_{m\acute{e}ca}$ établi sur 5 min, il est classé à un niveau exceptionnel. Egalement, son record sur 30 min correspond au niveau le plus élevé décrit par Coggan. Le profil du coureur renvoie probablement à celui d'un grimpeur puisque l'effort a été mesuré lors d'une étape de montagne.

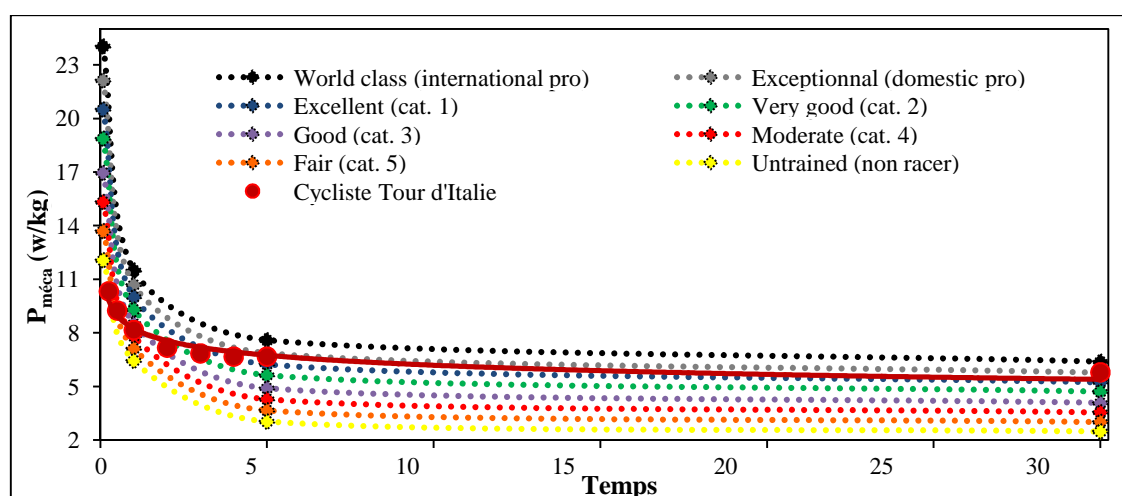


Figure 16 Relation $P_{m\acute{e}ca}$ – temps (en rouge foncé) d'un cycliste lors du Tour d'Italie par rapport aux niveaux définis par Allen et Coggan (2010) à partir des records de puissance maximale développés sur cette course à étapes, d'après les données de Vogt *et al.* (2007)

Sassi *et al.* (2006) ont largement étudié la relation $P_{méca}$ – temps limite avec des cyclistes de haut niveau pour évaluer l’endurance en utilisant le taux de lactate sanguin. A partir d’un grand nombre de cyclistes, ils ont proposé une équation qui prédit le t_{lim} lors d’un test rectangulaire à intensité sous maximale pour des t_{lim} compris entre 10 et 70 min. Ils ont mesuré le taux de lactate sanguin au bout de 10 min d’effort (intensité de départ choisie entre 50% et 90% de la $P_{méca}$ maximale) et la pente d’évolution de ce taux entre la 5^{ème} et la 10^{ème} min. Ils ont également utilisé cette méthode pour suivre l’évolution du potentiel physique des athlètes comme illustré sur la figure 17 qui représente l’évolution du temps limite d’un cycliste après la passation de trois tests à trois périodes différentes de l’entraînement (données non publiées). Cette méthode s’apparente donc à une méthode de suivi de la relation $P_{méca}$ – temps d’un cycliste à partir d’un protocole de laboratoire.

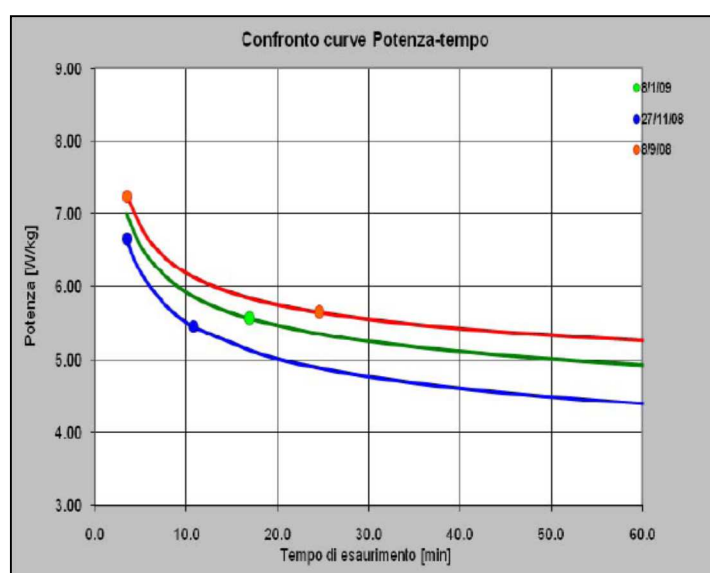


Figure 17 Evolution de la courbe $P_{méca}$ - temps d’un cycliste à partir d’un test de t_{lim} (Sassi, mapeisport.it/ivanbasso)

Bien que Vanhatalo *et al.* (2011) suggèrent que l’utilisation de la relation $P_{méca}$ – temps puisse permettre d’améliorer les performances dans les sports d’endurance, on recense très peu d’études dans la littérature scientifique d’utilisation de ce modèle avec des mesures de terrain dans le suivi de la performance chez des cyclistes. On peut cependant citer deux études préliminaires sur le sujet qui sont celle de Larrazabal *et al.* (2006) et celle de Villerius *et al.* (2007).

Larrazabal et al. (2006) ont effectué le suivi de cinq cyclistes professionnels pendant deux saisons afin d'établir la relation entre le temps de maintien et la $P_{méca}$ relative (par rapport au poids de l'athlète) (figure 18).

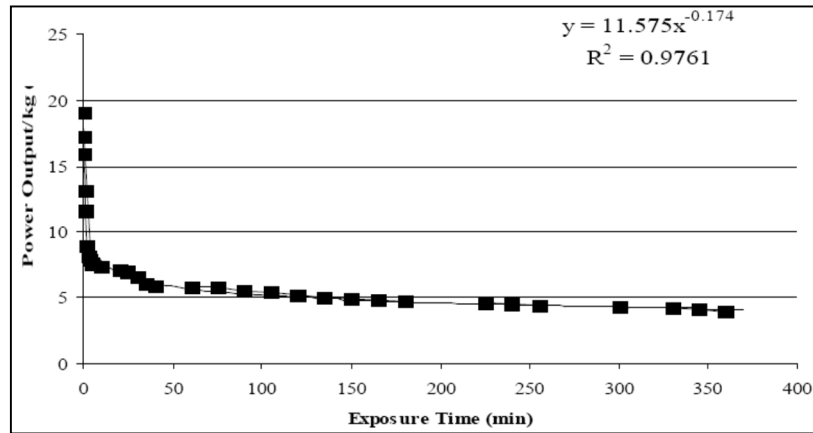


Figure 18 Relation $P_{méca}$ - temps de maintien à partir du suivi de 5 cyclistes professionnels (Larrazabal et al., 2006)

Villierius et al. (2007) ont mené une étude sur la détermination du profil physiologique à partir du suivi de cyclistes compétitifs de différents niveaux pendant 14 mois. Ils ont suggéré que ce profil de puissance (puissance maximum maintenue en fonction du temps) déterminait le profil physiologique de l'athlète à partir d'une « signature physiologique » de son potentiel physique. En effet, chaque cycliste possède son propre profil de puissance, qui est fonction de son niveau de pratique, de son profil technique et de son sexe (figure 19).

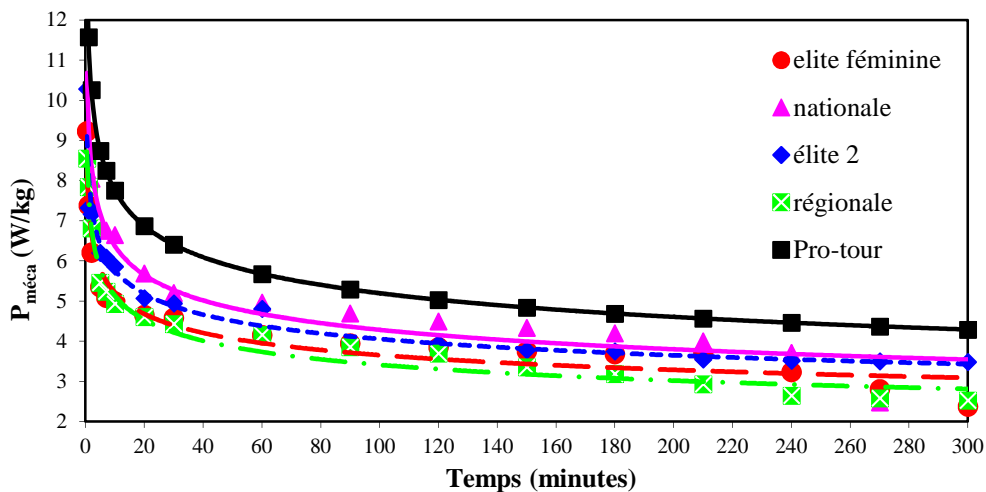


Figure 19 Profil de puissance de 5 cyclistes de différents niveaux (Villierius et al., 2007)

2.2. Mesure de la $P_{méca}$ en cyclisme

La mesure de la $P_{méca}$ en cyclisme peut s'effectuer de manière indirecte à l'aide de modèles mathématiques ou de manière directe grâce à différents systèmes. L'estimation indirecte des $P_{méca}$ à l'aide de modèles biomécaniques a été validée et est utilisée depuis de nombreuses décennies (Di Prampero *et al.*, 1979). Elle est devenue populaire au niveau médiatique ces dernières années notamment pour estimer le niveau des performances réalisées sur le Tour de France (Millet *et al.*, 2013). Dans une étude visant à comparer des $P_{méca}$ estimées et des $P_{méca}$ mesurées en situation de montée, Millet *et al.* (2013) ont utilisé le modèle mathématique de l'équation 17. Elle correspond à la somme des différentes résistances s'opposant à l'avancement de l'ensemble cycliste – vélo : la traînée aérodynamique, la gravité, les résistances au roulement et les résistances dues aux frictions mécaniques :

$$P_{méca} = \left[0,5 \cdot \rho \cdot SC_x \cdot (V_d + V_v)^2 \cdot V_d + \left(\frac{m \cdot g \cdot h}{d} \right) \cdot V_d + C_r \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot V_d \right] + F_b \quad (17)$$

Où ρ est dans la densité de l'air, SC_x est la surface frontale effective, V_d est la vitesse du cycliste, V_v est la vitesse du vent, m est la masse totale de l'ensemble cycliste – vélo, h est l'élévation totale, d est la distance parcourue, C_r est le coefficient de résistance au roulement, g est la gravité, $\cos \alpha$ est l'angle de la pente et F_b concerne les forces de friction associées aux systèmes de transmission.

Cette étude montre que pour mesurer indirectement des $P_{méca}$ réalisées en montée, certaines limites interviennent en présence de vent, ce qui complexifie l'estimation des paramètres de la traînée aérodynamique. En effet, dans ces conditions une mauvaise estimation de la vitesse et de la direction du vent, ainsi que du SC_x , altère significativement la précision des $P_{méca}$ estimées. Cela permet de comprendre pourquoi il est davantage compliqué d'estimer précisément des $P_{méca}$ réalisées sur terrain plat. De plus, les résistances au roulement, la masse estimée de l'ensemble cycliste – vélo, l'efficacité des transmissions mécaniques, l'estimation de la pente de la montée ou encore de la distance parcourue peuvent également avoir une influence négative sur la précision des mesures indirectes de $P_{méca}$. Toutes ces limites liées à l'utilisation des modèles mathématiques incitent à la prudence quand à l'utilisation des $P_{méca}$ estimées indirectement.

Afin de mesurer des $P_{méca}$ valides et fiables, différents systèmes de mesure directe de la $P_{méca}$ lors du pédalage ont été mis au point. Pendant longtemps, l'évaluation de la $P_{méca}$ en cyclisme est restée cantonnée en laboratoire à partir de cyclo-ergomètres conçus sur différents principes de freinage. Le dispositif le plus ancien consiste en un freinage mécanique où le réglage de la $P_{méca}$ est réalisé à l'aide d'une courroie freinant un volant d'inertie. Le système est facilement

étalonnable à l'aide d'un balancier. Les ergomètres de type « Monark » (figure 20) conçus sur ce modèle, ont longtemps été le système le plus couramment utilisé dans les études scientifiques.



Figure 20 Cyclo-ergomètre avec système de réglage de la $P_{\text{méca}}$ à partir d'un freinage mécanique par courroie (Monark, modèle 874E)

D'autres systèmes fixes utilisés en laboratoire utilisent un frein électromagnétique pour ajuster et mesurer la $P_{\text{méca}}$, le plus couramment utilisé étant le Lode Excalibur (figure 21). Il convient de souligner l'importance de pouvoir réaliser un étalonnage précis des différents systèmes utilisés pour obtenir des $P_{\text{méca}}$ valides. En effet, dans de nombreux centres médicaux ou sportifs, les techniciens ou entraîneurs ne sont pas toujours assez sensibilisés à la validité de la mesure de la $P_{\text{méca}}$ réalisée. Il est donc important de bien connaître les propriétés de validité, reproductibilité, sensibilité, précision et justesse du système utilisé (Grappe, 2012).



Figure 21 Cyclo-ergomètre avec système de réglage de la $P_{\text{méca}}$ à partir d'un freinage électromagnétique (Lode Excalibur)

Ce constat est d'autant plus vrai dans la conjoncture actuelle où depuis une vingtaine d'années, de nombreux capteurs de puissance embarqués, utilisables en conditions réelles sur le terrain, ont été développés et mis sur le marché. Ces systèmes fonctionnent à partir de jauges de contraintes qui mesurent la déformation d'un élément mécanique participant à la transmission de la force lors du pédalage (Grappe, 2012). De nombreuses études scientifiques se sont donc intéressées à la validité de ces différents systèmes afin d'en vérifier la validité et la reproductibilité (Jones S. et Passfield, 1998 ; Martin J. *et al.*, 1998 ; Lawton *et al.*, 1999 ; Gardner *et al.*, 2004 ; Bertucci *et al.*, 2005 ; Earnest *et al.*, 2005 ; Duc *et al.*, 2007 ; J. Hopker, 2010). Dans un contexte de recherche et de sport de haut niveau où les différences d'aptitudes physiques entre les athlètes et les quantifications de progression peuvent être inférieures à 1%, il est primordial que les erreurs de mesure des systèmes soient les plus faibles possibles. C'est le système SRM (Schoberer Rad Messtechnik, Julich, Allemagne) qui est aujourd'hui considéré comme le système de référence en terme de mesure de la $P_{\text{méca}}$ sur le terrain et en laboratoire (Jones S. et Passfield, 1998 ; Lawton *et al.*, 1999 ; Gardner *et al.*, 2004 ; Grappe, 2012).

Ce système calcule la $P_{\text{méca}}$ en mesurant la force appliquée sur les manivelles (couple) à partir de la déformation de jauges de contraintes placées à l'intérieur du pédalier. Le signal est ensuite converti en fréquences (Hz). Connaissant la vitesse de pédalage (tr/min), la $P_{\text{méca}}$ est calculée *via* l'équation 18 :

$$P_{\text{méca}} = \frac{(\text{Cadence} \cdot [\text{fréquence mesurée} - \text{fréquence du "zero offset"}] \cdot 2\pi)}{\text{"slope"} \cdot 60} \quad (18)$$

Où, le « zéro offset » est la fréquence (Hz) émise par le pédalier lorsqu'aucune force n'est appliquée sur les manivelles et le « slope » représente la pente (Hz/Nm), propre à chaque pédalier, de la relation entre le moment du couple de force (Nm) et la fréquence (Hz) équivalente.

Le compteur (PowerControl) affiche en instantanée et enregistre (fréquence d'enregistrement : 1 Hz) la $P_{\text{méca}}$ ainsi que la cadence, la vitesse, la fréquence cardiaque ou encore l'altitude (figure 22).



Figure 22 Système SRM avec le pédalier (contenant les jauges de contraintes) et le compteur, (Powercontrol) récepteur et afficheur des données

Outre sa précision, la configuration du système SRM permet de réaliser relativement facilement une procédure d'étalonnage du « slope » afin de vérifier la validité du système (Wooles *et al.*, 2005). Une méthode statique utilisable en routine consiste à construire la pente d'étalonnage en utilisant plusieurs masses différentes (généralement trois ou quatre entre 5 et 30 kg) appliquées par l'intermédiaire d'un crochet sur chaque manivelle reposant à 90° (figure 23). La pente est obtenue par la relation entre les fréquences mesurées équivalentes à chaque couples de force exercés par les masses (Grappe, 2012).

De plus, une calibration du système SRM est requise lors de chaque utilisation afin de contrôler la valeur de fréquence du « zero offset ». En effet, les jauges de contraintes étant des capteurs sensibles qui possèdent des caractéristiques physiques évoluant en réponse aux variations de facteurs extérieurs (température, humidité, pression barométrique...), il est important d'en effectuer la calibration. Nombreux sont les capteurs de puissance vendus aujourd'hui sur le marché dont il n'est pas possible de vérifier la calibration et l'étalonnage de manière simple et systématique.



Figure 23 Etalonnage par une méthode statique du pédalier SRM

Le système Powertap est un autre capteur de puissance dont la validité et la fiabilité ont été scientifiquement démontrées (Gardner et al., 2004 ; Bertucci *et al.*, 2005 ; Duc *et al.*, 2007). Il constitue le deuxième système de référence de la mesure de la $P_{\text{méca}}$ sur le terrain avec le SRM. Le principe de la mesure est différent de celui du pédalier SRM puisqu'il se situe au niveau du moyeu de la roue arrière (figure 24). La $P_{\text{méca}}$ est calculée à partir du produit du couple de force, mesuré par la déformation des jauges de contraintes, par la vitesse de rotation de la roue arrière. Comme le SRM, il est possible de calibrer manuellement le Powertap lors de chaque utilisation. En revanche, l'étalonnage ne peut être effectué en routine soi-même puisqu'il ne s'effectue que par une programmation sur un banc dynamique, ce qui est réalisable uniquement chez le constructeur ou les service-centers (Grappe, 2012).



Figure 24 Capteur de puissance Powertap avec le système de mesure à l'intérieur du moyeu

3. Synthèse et objectifs de travail

Bien que les recherches sur l'analyse de la relation intensité – temps ont débuté il y a plus d'un siècle, la littérature scientifique reste pauvre en ce qui concerne l'étude de cette relation en cyclisme. La majorité des travaux ont été réalisés en laboratoire en utilisant des concepts et des modélisations difficilement exploitables sur le terrain auprès d'athlètes de haut niveau. Cependant, l'amélioration des connaissances au cours des dernières décennies a permis de mieux appréhender les mécanismes physiologiques qui ont lieu lors d'efforts physiques maximaux. Elles ont permis une meilleure compréhension des processus sous-jacents responsables de la relation intensité – temps. A partir de la mesure directe en conditions réelles de la $P_{\text{méca}}$ via un système embarqué sur le vélo, il apparaît possible d'analyser rationnellement le potentiel physique du cycliste.

Toutefois, il semble que la $P_{\text{méca}}$ mesurée puisse être dépendante des conditions dans lesquelles elle est produite. En effet, plusieurs études tendent à rapporter que la nature du terrain pourrait influencer le niveau de $P_{\text{méca}}$ lors d'un effort intense (Padilla *et al.*, 2000 ; Bertucci *et al.*, 2007 ; Vogt *et al.*, 2007 ; Vogt *et al.*, 2007 ; Nimmerichter *et al.*, 2010) . D'autre part, en montée, les cyclistes alternent les positions assise et danseuse selon différents paramètres : le pourcentage et la longueur de la pente, le développement utilisé, l'expérience ou encore les dimensions corporelles. Il convient de remarquer que la littérature scientifique reste pauvre en ce qui concerne l'efficacité et l'étude de la position en danseuse lors d'efforts longs et soutenus en montée alors qu'il a été montré qu'elle favorisait les performances sur des efforts courts et intensifs (Millet *et al.*, 2002 ; Hansen et Waldeland, 2008). Bien que plusieurs études se sont intéressées à analyser les différences physiologiques entre les positions assis et danseuse (Swain et Wilcox, 1992 ; Tanaka *et al.*, 1996 ; Millet *et al.*, 2002 ; Fonda et Šarabon, 2012), leurs résultats divergent sans prendre en considération les différences interindividuelles comme le niveau de pratique, les qualités du cyclistes ou leur profil. En passant de la position assise à celle en danseuse, le redressement du buste et l'avancée du bassin permettent des oscillations du corps et du vélo qui entraînent une modification de l'orientation des forces appliquées sur la pédale (Caldwell *et al.*, 1998 ; Li et Caldwell, 1998). L'alternance entre les deux positions permet au cycliste de mettre en action différemment la chaîne musculaire des membres inférieurs et de profiter d'une force externe positive qui s'ajoute à la phase de poussée de la pédale : la gravité avec le poids du corps (Duc *et al.*, 2008). Dans cette position, le travail mécanique lié à l'appareil propulsif ($W_{\text{propulsion}}$) semble être plus important mais aucune étude n'a rapporté de mesures précises de

W_{ext} et de W_{int} dans cette posture. Ainsi, l'étude des oscillations du bassin en danseuse autoriserait l'analyse du travail mécanique résultant des mouvements du centre de masse (W_{ext}) lors de chaque coup de pédale. En effet, les variations des énergies potentielle et cinétique du centre de masse permettent la détermination du W_{ext} effectué par le cycliste lors du mouvement en danseuse, ce qui représente une composante importante du travail mécanique de la locomotion (Cavagna, 1975 ; Pfau *et al.*, 2005). A notre connaissance, aucune étude n'a encore mesuré la production d'énergie mécanique en danseuse au niveau du centre de masse du cycliste. Son analyse devrait permettre d'évaluer l'efficacité de la technique en position de danseuse et de mieux comprendre l'influence de cette posture sur les niveaux de $P_{\text{méca}}$ produits par le cycliste en montée.

L'objectif de la première partie de la thèse a été d'étudier la relation $P_{\text{méca}}$ – temps du cycliste à partir de mesures directes de la $P_{\text{méca}}$ réalisées en laboratoire, à l'entraînement et en compétition. Les études réalisées présentent comment la caractérisation du potentiel physique du cycliste est possible à partir de la détermination de la relation $P_{\text{méca}}$ records – temps, défini comme le Profil de Puissance Record (PPR), et comment ce dernier présente des intérêts dans le processus de suivi de l'entraînement. De plus, deux études complémentaires ont été conduites afin de mieux comprendre l'influence 1) des conditions et du profil du terrain sur la production de $P_{\text{méca}}$ et 2) de la technique en danseuse sur la production de $P_{\text{méca}}$, notamment en calculant le travail mécanique externe développé au niveau du centre de masse du cycliste.

L'étude I (*chapitre 2*) avait pour but de définir la méthodologie de détermination du PPR à partir du suivi d'une population de cyclistes de haut niveau sur une saison de compétition. L'objectif était de montrer que le PPR permet l'évaluation et le suivi du potentiel physique du cycliste selon son profil de performance. De plus, il autorise la détermination de zones d'intensités permettant d'affiner les processus d'entraînement à partir de la mesure de la $P_{\text{méca}}$.

L'étude II (*chapitre 3*) a montré, à partir du suivi longitudinal d'un athlète de classe mondiale sur 6 années, que le PPR autorise la traçabilité des performances et la quantification de l'évolution du potentiel physique du cycliste. L'analyse de l'évolution des $P_{\text{méca}}$ records et du suivi de la quantification de la charge d'entraînement sur cette période présente un aperçu original du processus de suivi d'entraînement d'un athlète accédant au plus haut niveau mondial.

L'étude III (*chapitre 4*) avait pour objectif de proposer une méthodologie de terrain à partir du PPR autorisant la détermination de la PMA, de T_{PMA} et d'un index d'endurance aérobie. Le suivi de la $P_{méca}$ de 28 cyclistes de haut niveau durant deux saisons de compétition a permis de présenter un modèle mathématique d'évaluation de la PMA et de T_{PMA} propre à chaque cycliste. A partir de cette méthodologie, il devient possible de calculer un index d'endurance aérobie se basant sur la méthode de Peronnet et Thibault (Peronnet *et al.*, 1987 ; Tokmakidis *et al.*, 1987).

L'étude IV (*chapitre 5*) a étudié l'influence des conditions et du profil du terrain sur les valeurs de $P_{méca}$ lors d'un exercice maximal. Les résultats de tests maximaux sur 4 min en laboratoire, sur terrain plat et en montée autorisent une meilleure compréhension de l'impact du terrain sur la mesure de $P_{méca}$ et par conséquent sur l'établissement du PPR du cycliste.

L'étude V (*chapitre 6*) avait pour but d'analyser la technique en danseuse chez des cyclistes de haut niveau à partir de la mesure de la $P_{méca}$ au niveau du centre de masse sur différentes pentes. L'hypothèse que nous posons est qu'en fonction de la technique utilisée dans cette position, les cyclistes sont capables de transférer une plus ou moins grande quantité d'énergie au niveau du pédalier (efficacité mécanique). Cette étude pourrait donc permettre d'objectiver l'évaluation de la technique en danseuse et de mieux comprendre si le transfert d'énergie entre les énergies potentielles et cinétiques ont un lien avec l'efficacité mécanique.

CHAPITRE 2 : Etude I : Détermination du Profil de Puissance Record

Les résultats de ce travail ont fait l'objet d'un article publié dans la revue *International Journal of Sports Medicine* : « The Record Power Profile to assess performance in elite cyclists » (Pinot J. et Grappe, 2011).

Résumé détaillé

The Record Power Profile to assess performance in elite cyclists

Pinot J et Grappe F

Objectif : L'objectif était de 1) déterminer la méthodologie de détermination du PPR de différentes catégories de cyclistes de haut niveau, et 2) analyser l'influence du profil de performance en course sur le PPR à partir de la définition de différentes zones d'intensité d'effort.

Méthodes : 17 cyclistes de haut niveau (9 professionnels et 8 élites U23) ont réalisé l'ensemble des entraînements et des compétitions durant 10 mois avec un capteur de puissance SRM. Ces cyclistes étaient classés en 3 groupes selon leur profil de performance en compétition : sprinteur (n = 5), grimpeur (n = 7) et rouleur (n = 5). Les données ont été traitées afin d'évaluer pour chaque athlète les 13 $P_{méca}$ records correspondant aux $P_{méca}$ enregistrées les plus élevées sur des temps de 1, 5 et 30 sec, 1, 5, 10, 20, 30, 45 et 60 min, 1, 2, 3 et 4 h. Le PPR d'un cycliste correspondait à la relation entre les $P_{méca}$ records et les durées équivalentes. Les zones d'intensité d'effort ont été déterminées à partir du PPR sur la base des classifications de Jones A. M. *et al.* (2009), Francis *et al.* (2010) et Vogt *et al.* (2006) : zone 1 (intensité modérée : $P_{méca}$ record entre 1 et 4h), zone 2 (intensité soutenue : $P_{méca}$ record entre 20 et 60 min), zone 3 (partie basse de la zone d'intensité sévère : $P_{méca}$ record entre 5 et 20 min), zone 4 (partie haute de la zone d'intensité sévère : $P_{méca}$ record entre 30 sec et 5 min) et zone 5 (force – vitesse : $P_{méca}$ record entre 1 et 30 sec).

Résultats : Le PPR moyen du groupe de cyclistes de haut niveau a été exprimé à partir de la relation entre les $P_{méca}$ records moyennes et le temps (figure 25). Il n'existait pas de différence

significative entre le PPR des cyclistes professionnels et celui des élites U23. Cependant, une tendance montrait que les $P_{méca}$ records entre 5 et 60 min étaient plus élevées chez les professionnels. L'analyse des niveaux de $P_{méca}$ records dans les différentes zones d'intensité en fonction du profil de performance a montré que 1) les $P_{méca}$ records de la zone 5 étaient significativement supérieures chez les sprinteurs, 2) les $P_{méca}$ records dans les zones 2 et 3 étaient significativement supérieures chez les grimpeurs, 3) les $P_{méca}$ records des zones 2 et 3 des rouleurs étaient significativement supérieures à celles des sprinteurs et enfin, 4) les $P_{méca}$ records de la zone 1 des grimpeurs et des rouleurs étaient significativement supérieures à celles des sprinteurs.

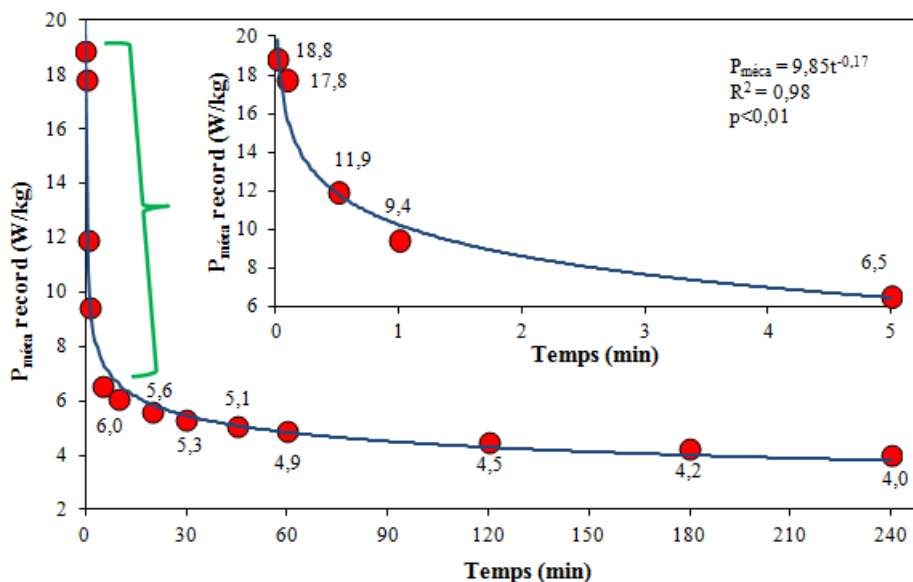


Figure 25 PPR moyen des 17 cyclistes

Discussion : Cette étude est originale dans le sens où elle présente un suivi longitudinal des $P_{méca}$ réalisées à l'entraînement et en compétition par un groupe de cyclistes de haut niveau sur une saison de compétition complète. Le PPR de tous les cyclistes a été établi à partir de la relation $P_{méca}$ records – temps. Le fait de recueillir un grand nombre d'enregistrements de la $P_{méca}$ en compétition donne une certaine légitimité et crédibilité au PPR dans la mesure où l'on sait pertinemment que c'est essentiellement dans les conditions de compétition que les sportifs parviennent à exploiter le maximum de leur potentiel physique pour établir des performances. Dans ce contexte, nous considérons les $P_{méca}$ enregistrées à l'entraînement et en compétition les plus élevées comme des $P_{méca}$ records puisqu'elles ne correspondent pas

obligatoirement aux $P_{méca}$ maximales pouvant être produites par les cyclistes. Dans ce sens, des records peuvent être battus.

Le PPR permet l'étude des $P_{méca}$ records à l'intérieur des 5 zones d'intensité d'exercice précédemment définis. Les comparaisons interindividuelles ont montré qu'il n'existait pas de différence significative entre les cyclistes professionnels et les cyclistes élites U23 bien qu'il existe une tendance pour des $P_{méca}$ records supérieurs entre 5 et 60 min chez les professionnels. Ce résultat s'explique par le fait que les cyclistes élites U23, appartenant tous pour la plupart à leur équipe nationale U23, possédaient des potentiels physiques assez proches des athlètes professionnels. D'autre part, la comparaison des PPR des différents profils de cyclistes à travers les différentes zones d'intensité a permis de mettre en lumière leurs qualités physiques essentielles. Les sprinteurs possèdent les $P_{méca}$ les plus élevées dans la zone 5 c'est-à-dire lors des efforts compris entre 1 et 30 sec. Les grimpeurs et les rouleurs possèdent les $P_{méca}$ les plus élevées dans les zones 2 et 3, à savoir sur des durées comprises entre 5 et 60 min. La différence entre ces deux profils types est bien mise en évidence lorsqu'est pris en compte ou non leur masse. En effet, avec la puissance normalisée (W/kg), les grimpeurs plus légers, possèdent des $P_{méca}$ records plus élevées, alors qu'en puissance brute (W), les rouleurs possèdent les plus hautes $P_{méca}$ records dans ces zones.

Au total, le PPR peut être considéré comme une véritable signature biomécanique du potentiel physique du cycliste. Il trouve également toute son importance et son originalité dans le suivi personnalisé de l'athlète, notamment dans l'optimisation du processus d'entraînement et dans l'analyse de l'évolution de la capacité de performance en compétition en rapport avec le potentiel physique du moment. Avec cet outil, on dispose d'une traçabilité de l'évolution longitudinale du potentiel physique du cycliste.

Conclusion : Les principaux résultats ont montré que le PPR présente un concept valide et pertinent qui permet d'exprimer le potentiel physique du cycliste à partir de la relation $P_{méca}$ – temps. Il met en évidence les qualités physiques du cycliste à partir de différents niveaux de $P_{méca}$ records compris dans cinq zones d'intensité. Il apparaît comme une méthode innovante pour le contrôle et le suivi du processus d'entraînement avec un étalonnage spécifique des intensités de travail avec la $P_{méca}$.

The Record Power Profile to Assess Performance in Elite Cyclists

Authors

J. Pinot, F. Grappe

Affiliation

Département Santé et Sports, Equipe Culture – Sport – Santé – Société (C3S) UPFR-Sports, 31 chemin de l'épitahe, Besançon, France

Key words

- performance
- cycling
- power profile
- physical capacities
- SRM powermeter

Abstract

The purpose of this study was to assess the Record Power Profile (RPP) of cyclists, i.e., the relationship between different record Power Output (PO) and the corresponding durations through a whole race season. We hypothesized that PO of different effort durations could differ according to the cyclist's category and race performance profile. 17 cyclists (9 professionals and 8 elites) performed all trainings and competitions during 10 months with a mobile power meter device (SRM) mounted on their bike. The results show that the cyclists' RPP is a hyperbolic

relationship between the different record PO and time durations. It significantly reflects the characteristics of different skills: 1) sprinters have the highest record PO within zone 5, 2) climbers present the highest record PO within zones 2–3 and, 3) climbers and flat specialists have higher zone 1 record PO than sprinters. These results suggest that the RPP represents "a signature" of the cyclists' physical capacity and that it allows the determination of different training intensities. The RPP appears as a new concept that is interesting for coaches and scientists in order to evaluate performance in cycling.

Introduction

Training and racing with a powermeter (SRM, Powertap) has nowadays become the norm of many elite cyclists, making the power output (PO, W) data readily available. The PO measurements enable the assessment of the cyclist's training and racing intensity zones according to their skills and thus, to their race performance profile: sprinters, climbers and flat specialists. These PO-based intensity zones optimise the training program. Recent studies [5,8] showed that when PO is used to determine intensity domains, one must take into account an unavoidable law imposed by human physiology, which says that one's level of PO and the duration it can be sustained are directly hyperbolically related. The relationship between PO and time has been studied since the second part of the XXth century. Monod and Scherrer were the pioneers and characterised this relationship from a hyperbolic function [9, 18, 19]. They determined the concept of critical power from the fact that the time to exhaustion is inversely proportional to the rate at which the work is performed. However, their studies were cut down only for local muscular exercises and exercise durations between 4 and

30 min. Thereafter, many studies extrapolated the hyperbolic model to the level of the total body: Moritani [10], Morton [11], Wilkie [26] and specially, Peronnet and Thibault [12, 13]. The latter developed a physiological model of running performance. Their analysis provides a description of world running records. The model allows the computation of an objective measure of endurance: the index of endurance capability. It corresponds to the slope of the relationship between the percentage of VO₂max which can be sustained and the running time from 7 min to 2 h.

Few studies have investigated the relationship between PO and time in cycling. In several studies [2, 3, 14, 15, 24, 25] the maximum mean power (MMP) during competition has been analysed to assess the cyclist's capacity to produce PO according to different durations ranging between 5 s to 30 min. To the best of our knowledge, there has only been one study (unpublished observations) that has conducted a PO follow-up during a long period (Larrazabal et al., Birmingham, oral communication at the Endurance Sports Science Conference, 2006). They studied the MMP over different durations (between 1 s and 6 h) in road cycling races. They reported a power profile from

accepted after revision
May 09, 2011

Bibliography

DOI <http://dx.doi.org/10.1055/s-0031-1279773>
Published online:
November 3, 2011
Int J Sports Med 2011; 32:
839–844 © Georg Thieme
Verlag KG Stuttgart · New York
ISSN 0172-4622

Correspondence

Julien Pinot
Département Santé et Sports
Equipe Culture –
Sport – Santé – Société (C3S)
UPFR-Sports
31 chemin de l'épitahe
25000 BESANCON
France
Tel.: +33/607/797 225
Fax: +33/384/537 838
julienpinot@laposte.net

a 2 year PO follow-up with 5 Spanish professional cyclists. The only studies which reported intensity domains according to the PO – time curve determined training zones with time durations between 2 and 15 min [8] and according to a 3-min all-out cycling test in laboratory [5]. Jones *et al.* [8] who reviewed in a recent paper the historical foundations of the PO – time-to-exhaustion relationship, defined 3 intensity domains according to the critical power (CP) concept: the severe exercise intensity (high intensity) zone for time to-exhaustion values between approximately 2 and 15 min (i.e., CP), the heavy exercise intensity zone between the lactate threshold (LT) and CP and, the moderate intensity exercise zone below LT. The CP presents the upper boundary of the heavy exercise domain and the lower boundary of the severe exercise intensity domain. Within these 3 intensity domains, Francis *et al.* [5] determined 5 training intensity zones: zone 1 within the moderate intensity domain, zones 2–3 within the heavy intensity domain and zones 4–5 within the severe intensity domain. To the best of our knowledge, no study reported training zones from a PO – time curve within a broad range of time durations regularly used by elite cyclists in races (1 s to 4 h) with PO data collected in real road cycling. In a recent invited commentary, Vantahalo *et al.* [21] suggested that the PO – time relationship may still be relevant for considerably longer endurance events (such as road cycling). We propose an original study conducted over several months on the follow-up of the record PO, i.e., the highest PO produced by the cyclist, during the whole competitive season among a heterogeneous population of cyclists to analyse the effect of the cyclist's skills on the power profile (PO – time curve). We prefer the term of "record PO" in the place of MMP because we consider the highest PO obtained during racing and training. Thus, the power profile of a cyclist, defined as the Record Power Profile (RPP) corresponds to the relationship between different sequential records of PO and the corresponding time durations (races durations) during a whole race season.

The purpose of this study was to determine the RPP within a broad range of time durations of different categories of cyclists and to analyse the effect of their performance profile in race (skills) within different exercise intensity domains determined from the RPP. We hypothesized that the levels of PO in the different exercise intensity zones could be different according to the cyclist's categories and their physical skills.

Methods



Subjects

17 riders agreed to take part in the present study. Their mean (\pm SD) age, height, body mass and Maximal Aerobic Power (MAP) were 24 ± 4 years, 178 ± 4 cm, 67 ± 6 kg and 6.4 ± 0.4 W.kg⁻¹, respectively. MAP was determined from an incremental specific cycling test (30 W/2 min) with a SRM Indoor Trainer [4]. Prior to participating in any testing sessions, each subject provided written informed consent in accordance with the institutional Human Research Ethics Committee and the study was performed in accordance with the ethical standards of the International Journal of Sports Medicine [7]. 9 cyclists were members of professional cycling teams and covered between 25 000 and 35 000 km per year. The others (n=8) were elite cyclists and classed 1st category in France, with 6 of them belonging to the U23 national team. They covered a total of kilometers ranging from 15 000 to 23 000 km per year. All the cyclists had a high

performance level and their average weekly training time was 20 h. The cyclists were divided in different groups according to their skills in race: sprinters (n=5), climbers (n=7) and flat specialists (n=5) [16,23,24].

SRM measurements

The cyclists performed all their trainings and competitions during 10 months (December to September) with a mobile power meter mounted on their bike (SRM Professional Training systems, Schoberer Rad Messtechnik, Jülich, Germany). They were given instructions on how to use the SRM Powermeter. According to the manufacturers' recommendations, the calibration slope of each SRM was verified 3 times during the season by using a static calibration to determine the relationship between the torque (Nm) and frequency (Hz) [27]. For all SRMs, the static calibration confirmed the slope that was previously established by the manufacturers. In order to take into account both, the climatic conditions and the residual torque (no force applied on the crank) applied on the SRM system, the zero offset frequency procedure was performed by the cyclists before each training and race (according to the manufacturer's recommendations). They were informed of the importance to perform this procedure in order to obtain accurate PO data [6].

SRM data analyses

After each training and competition, the cyclists transferred their data from the power control to their computer using SRM Software (v6.41.04 Schoberer Rad Messtechnik, Germany). The cyclists trained on an average of 6 times per week, which corresponds to about 250 files per cyclist over the 10 months. After receiving their files by email, the data was performed with the use of TrainingPeaks software (WKO+, v3.0, Peakware, CO, USA). All the data were analysed in order to determine the RPP of the cyclists. The different record PO correspond to 13 MMP for times of 1, 5, 30, 60 s, 5, 10, 20, 30, 45, 60, 120, 180, 240 min. The RPP of a cyclist corresponds to the relationship between the 13 MMP and the different durations including all the races and trainings during one season of competition. The PO in the RPP was expressed relative to the cyclist's body weight (W.kg⁻¹).

Exercise intensity zones

The exercise intensity zones were determined from the RPP using the 13 record PO, on the one hand according to exercise intensity domains defined by Jones *et al.*, [8], Francis *et al.*, [5] and Vogt *et al.*, [22] and on the other hand, from the PO distribution according to time in different elites races [3,23–25]. The exercise intensity zones were defined as follows: zone 1 (between 1 and 4 h; moderate exercise intensity), zone 2 (between 20 and 60 min; heavy exercise intensity; traditional individual time trial and long climbs), zone 3 (between 5 and 20 min; low part of the severe intensity zone; short individual time trial), Zone 4 (between 30 and 5 min; high part of the severe intensity zone; long maximal sprint) and zone 5 (between 1 and 30 s; force – velocity zone; short maximal sprint).

Statistics

Descriptive statistics were used and all data were expressed as mean \pm standard deviation (SD). A Kolmogorov-Smirnov-Lillfors test was applied to ensure a Gaussian distribution of all results. A one-way Analysis of Variance (ANOVA) was used to assess the decrease of the record PO over the time. A first two-way ANOVA (categories vs. record PO) was used to analyse the influence of

Table 1 Average record PO for different time durations (for the 17 cyclists).

| | Zone 5 | | | | | Zone 4 | | | | | Zone 3 | | | | | Zone 2 | | | | | Zone 1 | | | | | | |
|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------|------|------|--------|------|------|-----|-----|--------|-----|-----|------|------|------|--|
| | 1' | 5' | 30'' | 60' | 5' | 30'' | 60' | 10' | 20' | 30'' | 45' | 60' | 120' | 180' | 240' | 120' | 180' | 240' | 60' | 45' | 30'' | 45' | 60' | 120' | 180' | 240' | |
| (W) | 1.258±165 | 1.181±144 | 793±93 | 617 ^a ±54 | 432 ^a ±31 | 401 ^a ±35 | 372 ^a ±32 | 353 ^b ±31 | 335 ^c ±26 | 324 ^d ±24 | 295 ^e ±18 | 280 ^f ±21 | 268±21 | | | | | | | | | | | | | | |
| C.V. (%) | 13.1 | 12.1 | 11.7 | 8.7 | 7.2 | 8.6 | 8.7 | 8.8 | 7.8 | 7.4 | 6.1 | 7.5 | 7.8 | | | | | | | | | | | | | | |
| (W.kg ⁻¹) | [988-1562] | [944-1443] | [637-1016] | [550-0-715] | [360-483] | [330-462] | [313-434] | [303-420] | [294-392] | [274-357] | [258-329] | [229-314] | [221-303] | | | | | | | | | | | | | | |
| (W.kg ⁻¹) | 18.9 ^a ±1.3 | 17.8 ^a ±1.1 | 11.9 ^a ±0.9 | 9.4 ^a ±0.5 | 6.5 ^a ±0.4 | 6.0 ^a ±0.4 | 5.6 ^a ±0.3 | 5.3 ^b ±0.3 | 5.1 ^c ±0.4 | 4.9 ^d ±0.3 | 4.5 ^e ±0.2 | 4.2 ^f ±0.2 | 4.0±0.2 | | | | | | | | | | | | | | |
| C.V. (%) | 7.1 | 6.3 | 7.9 | 5.4 | 6.1 | 6.0 | 6.4 | 6.4 | 7.2 | 6.6 | 5.2 | 5.4 | 5.9 | | | | | | | | | | | | | | |
| (W.kg ⁻¹) | [15.9-21.4] | [15.7-19.6] | [10.1-13.6] | [8.5-11-10.6] | [5.9-7.3] | [5.4-6.8] | [4.9-6.2] | [4.7-6.0] | [4.4-5.7] | [4.2-5.5] | [4.0-5.0] | [3.6-4.7] | [3.4-4.4] | | | | | | | | | | | | | | |

Values are Mean±SD. Coefficient of Variation across the group (%) and Range [minimum-maximum]. ^asignificant difference between all record PO (p<0.05), ^bsignificant difference between all record PO except for 45' (p<0.05), ^csignificant difference between all record PO except for 60' (p<0.05), ^dsignificant difference between all record PO except for 120' (p<0.05), ^esignificant difference between all record PO except for 180' (p<0.05), ^fsignificant difference between all record PO except for 240' (p<0.05)

the competition's level according to the RPP. A second two-way ANOVA (athlete's skills vs. exercise intensity zones) was used to analyse the influence of the athlete's skills on the exercise intensity zones. When a significant effect was detected, a post-hoc comparison was made using PLSD of Fischer test. Statistical significance was set at p-value <0.05.

Results

Table 1 presents the decrease of the average record PO for all the subjects between 18.9W.kg⁻¹ (1s) and 4.0W.kg⁻¹ (4h). The results indicate that time has a significant effect (p<0.001) on the record PO decrease between 1s and 4h. The record PO decrease presents 3 parts. In a first part, between 1s and 5min, there is a very important decrease (-65%; from 18.8W.kg⁻¹ to 6.5W.kg⁻¹). In a second part, between 5min and 60min, the decrease is less important (-25%; from 6.5W.kg⁻¹ to 4.9W.kg⁻¹). In the last part, between 60min and 4h, the decrease is lower (-18%; from 4.9W.kg⁻¹ to 4.0W.kg⁻¹).

The changes in record PO between the cyclists are different according to the time: the most important difference is 8.9W.kg⁻¹ for 1s whereas it is only 1.2W.kg⁻¹ for 4h. The coefficients of variation (CV) between the 17 athletes expressed in normalised PO (W.kg⁻¹) are lower than when expressed in absolute PO (W) (respectively between 5.2 and 7.9 vs. between 6.1 to 13.1). Indeed, the normalized PO understates the differences between the subjects. Fig. 1 presents the average RPP for the 17 cyclists. It shows a hyperbolic relation between the record PO and time (R²=0.99, p<0.001) characterised by the equation: PO=9.85.t^{-0.17}.

There is no significant difference in RPP between the professional and elite cyclists (PO=9.88.t^{-0.17} for the professionals and PO=9.80.t^{-0.17} for the elites). However, a trend exists: the professional record PO are higher than the elite record PO for durations that range between 5min and 1h (respectively 6.6W/kg vs. 6.5W/kg for 5min, 6.2W/kg vs. 5.9W/kg for 10min, 5.7W/kg vs. 5.5W/kg for 20min, 5.4W/kg vs. 5.2W/kg for 30min, 5.1W/kg vs. 5.0W/kg for 45min, 5.0W/kg vs. 4.8W/kg for 60min duration).

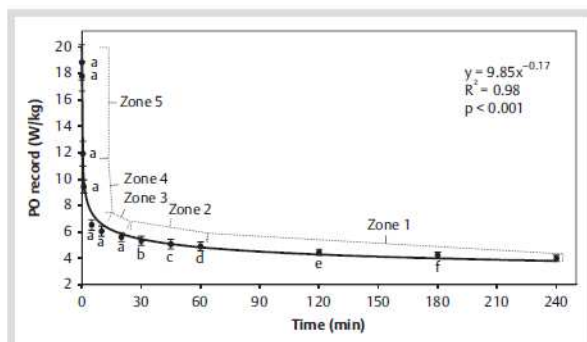


Fig. 1 Average RPP of the 17 cyclists.

- ^a significant difference between all record PO (p<0.05),
- ^b significant difference between all record PO except for 45' (p<0.05),
- ^c significant difference between all record PO except for 60' (p<0.05),
- ^d significant difference between all record PO except for 120' (p<0.05),
- ^e significant difference between all record PO except for 180' (p<0.05),
- ^f significant difference between all record PO except for 240' (p<0.05).

◦ Fig. 2 shows the RPP according to the cyclist's skills and the different exercise intensity zones. The two-way ANOVA (cyclist's skills vs. exercise intensity zones) indicates that time has no effect on the decrease of the record PO within each intensity zone according to the cyclist's skills. The record PO within the zone 5 of the sprinters are significantly higher than for the other cyclists (20.2 W/kg vs. 19.3 W/kg and 18.2 W/kg). The record PO within the zones 2–3 of the climbers and the flat specialists are significantly higher than for the other cyclists and the sprinters, respectively (6.8 W/kg and 5.9 W/kg vs. 6.5 W/kg and 5.6 W/kg vs. 6.1 W/kg and 5.3 W/kg). Finally, both the climbers and the flat specialists present significantly higher record PO within zone 1 than the sprinters (4.1 and 4.0 W/kg vs. 3.8 W/kg).

◦ Fig. 3, 4 present 2 examples of changes in RPP during a whole season for a cyclist (◦ Fig. 3) and at the end of the season between 2 cyclists (◦ Fig. 4).

Discussion

The purpose of the present study was to determine the RPP of different categories of cyclists within a broad range of time durations, and to analyse the effect of their performance profile in races (i.e., their skills) within different exercise intensity domains determined from the RPP. The results of this study are original because to the best of our knowledge no study has been conducted on this topic by taking into account a PO follow-up among a heterogeneous population of cyclists during the whole competitive season.

The RPP of the cyclist was determined from the relationship between 13 different record PO and the time of exercise. The majority of the record PO were obtained in races except those of 1 and 5 s that were generally obtained during training. Indeed, cyclists generally provide this type of effort at the finish of a race with an important rate of accumulated fatigue. We preferred the term of "record PO" instead of MMP because we consider that the highest PO obtained during competition and training, i.e., the highest PO developed by the cyclist, is not the maximum that can be achieved by the cyclists. This is mainly due to the fact that many factors such as drafting, team tactics, types of terrain and environmental conditions influence the PO in the field. The results show a hyperbolic relation as previously described by Monod and Scherrer [9, 18, 19]. The relationship of PO vs. time is interesting because it reflects the physiological law which states that the higher the exercise intensity, the shorter the time of exercise according to a hyperbolic decrease. This decrease can be explained by the combined actions of the different bioenergetic processes according to the different sources of energy supply. It is similar to the decline of velocity and/or oxygen consumption according to time [10–13, 26].

The mean RPP of all cyclists can be expressed by the equation: $PO = 9.85 \cdot t^{-0.17}$ ($R^2 = 0.98$). This equation models the power profile for a large and heterogeneous population of cyclists. Larrazabal et al. (2006, unpublished observations) found a similar equation ($PO = 11.58 \cdot t^{-0.17}$, $R^2 = 0.97$) for a population of 5 professional road cyclists. This result suggests that the decrease of record PO with time can be modelled by a typical equation: $PO = a \cdot t^{-0.17}$. The same exponent means that the decrease according to time is similar. However, the constant « a » determines the height of the record PO – time curve. Indeed, the equation of Larrazabal et al. overestimates the PO compared to our equation. For 1 s and 20 min, we found $23.6 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $6.9 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ with

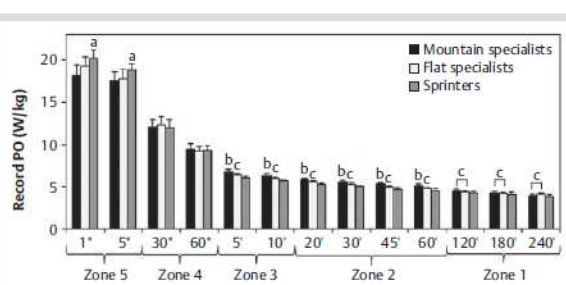


Fig. 2 RPP according to the cyclist's skills and exercise intensity zones. ^a significant difference between climbers and flat specialists ($p < 0.05$), ^b significant difference between sprinters and flat specialists ($p < 0.05$), ^c significant difference with sprinters ($p < 0.05$).

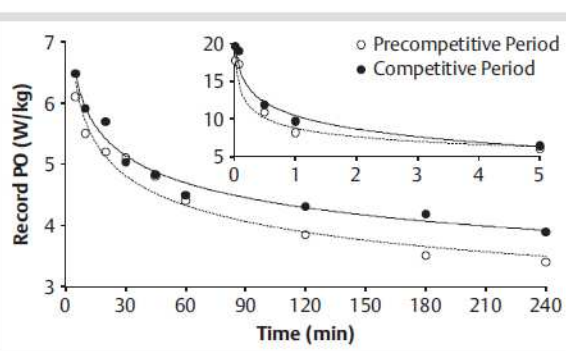


Fig. 3 Changes in cyclist's RPP between the pre-competitive period (December to March) and the competitive period (March to September) on time durations between 1 s–5 min (top panel) and between 5 min–4 h (bottom panel).

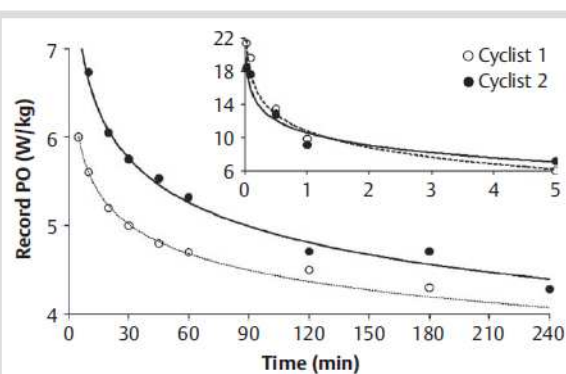


Fig. 4 Comparison of the RPP of 2 cyclists on time durations between 1 s–5 min (top panel) and between 5 min–4 h (bottom panel).

Larrazabal's equation vs. $20.1 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $5.8 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ with our equation, respectively. The values of Larrazabal appear also to overestimate when compared to other studies [2, 3, 14, 15, 24, 25]. The MMP found over 1 s, 5 min and 20 min are $23.6 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$, $7.8 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $6.4 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. No other study revealed equivalent PO on corresponding time durations.

The RPP allows the study of PO within 5 exercise intensity zones according to previous studies [3, 5, 8, 21, 23–25]: moderate exercise intensity (zone 1: between 2 and 4 h), heavy exercise intensity (zone 2: between 20 and 60 min), low part of the severe intensity zone (zone 3: between 5 and 10 min), high part of the

severe intensity zone (zone 4: between 30 and 60 s) and force-velocity zone (zone 5: between 1 and 5 s). No significant difference in the overall RPP (i.e., within the different intensity domains) was observed between the elite and the professional RPP, but there seems to be a trend. The professional cyclists have higher record PO (about 0.2 W/kg) than the elite cyclists for durations within the zones 2 and 3 (between 5 min and 1 h). Firstly, this small difference can be explained by the fact that the elite cyclists in our study were represented by several young cyclists who belong to the U23 national teams and have a physical potential that will probably allow them to become professional in the coming years. Thus, their physical capacities were already well developed and some of these cyclists were specialised in a specific domain (e.g., sprint or climbing). Secondly, the professional cyclists were of heterogeneous level from national to world top-10 (Continental team helper to Pro Tour leader). Finally, these 2 cyclists' populations were composed of many cyclists with different skills and all having an important physical potential.

In cycling, it is not always the strongest cyclist who wins. Due to drafting, race tactics and the nature of the terrain, various types of cyclists can express themselves and win. So, we have obtained significant results with the comparison of the cyclist's skills divided into sprinters, climbers and flat specialists. The sprinters have the significantly highest record PO within zone 5. This is natural because their specificity is based on their aptitude to produce a high level of PO during short times especially in the sprint during the finish of a race. The climbers present the highest record PO within zones 2 and 3. Indeed, these domains are their strongest points when PO is normalised relative to their body weight (in $W \cdot kg^{-1}$). The climbers are characterised by a high level of performance in climbs with durations that range between 5 and 50 min (zones 2 and 3). Their lightness is a great advantage to overcome the force of gravity in the climbs with important slopes. However, when their record PO are expressed in absolute PO (in W), the benefit is lost. This certainly explains why they have more difficulties riding on the flat ground. Inversely, the flat specialists present high record PO within zones 2 and 3 when the values are expressed in absolute PO. On flat ground, the body weight has a negligible effect when cycling at a regular speed without acceleration-deceleration phases and 90% of the total PO is developed against the aerodynamic drag [1]. So, future studies will deal with the measurement and modelling of aerodynamic drag in a wind-tunnel in order to assess performance on flat ground and to link it to the RPP. Finally, both the climbers and the flat specialists present the highest record PO within zone 1 compared to the sprinters. The low record PO of the sprinters between 2 and 4 h can be due to race tactics, because for a large part of the race they stay in the bunch. They try to benefit from drafting in order to keep a maximum energy for the final sprint.

The results of our study indicate that the RPP is more linked with the different exercise intensity zones of the cyclist than with the competition level. For example, a professional sprinter has a high record PO within zone 5 but he probably has a lower record PO within zone 2 than an elite category flat specialist. Our results suggest that the RPP can represent an interesting signature i.e., a kind of identity card of the physical potential of the cyclist. Each cyclist has a different physical potential and the RPP can model it. The changes in PO within the different exercise intensity zones can be observed through the PO follow-up procedure during a whole race season and along different seasons. The intra and inter-individual changes in RPP (► Fig. 3, 4) agree with the

seasonal changes in aerobic fitness indices in elite cyclists reported by Sassi et al. [17]. This gives knowledge about the improvement of the cyclist's capacities in cycling. This concept is very attractive for the coach to track the cyclist's fitness. The coach will exactly know if the athlete is close to his optimal fitness. Furthermore, it is possible to determine optimal training intensities from the 5 exercise intensity zones of the RPP data for power-based training. This evaluation of the training intensities appears more accurate compared to the conventional laboratory tests because it comes from performances performed in the field by cyclists on their personal bikes. Changes in the training program can be made in response to the RPP allowing the coach to optimize the training process.

Schumacher and Pottgiesser proposed to establish a performance profiling to target suspicious athletes in the fight against doping [20]. Our results suggest that the RPP could be integrated in this approach in order to monitor the changes in the different physical capacities of the cyclist during several competitive seasons.

In conclusion, our study shows the new RPP concept, which allows to express the physical potential of the cyclist through the relationship between different record PO and time. The RPP reflects the skill of the cyclist according to the levels of PO in different exercise intensity zones. It appears to be an innovative method for the cycling training process with an optimization of the training intensities for power-based training.

Acknowledgements

▼
The authors would like to thank the participating cyclists for their cooperation and Vincent Villerius for his technical support.

References

- 1 Candau R, Grappe F, Menard M, Barbier B, Millet GY, Hoffman MD, Belli A, Rouillon JD. Simplified deceleration method for assessment of resistive forces in cycling. *Med Sci Sports Exerc* 1999; 31: 1441-1448
- 2 Ebert TR, Martin DT, McDonald W, Victor J, Plummer J, Withers RT. Power output during women's World Cup road cycle racing. *Eur J Appl Physiol* 2005; 95: 529-536
- 3 Ebert TR, Martin DT, Stephens B, Withers RT. Power output during a professional men's road-cycling tour. *Int J Sports Physiol Perform* 2006; 1: 324-335
- 4 Faria EW, Parker DL, Faria IE. The Science of cycling, physiology and training-Part 1. *Sports Med* 2005; 35: 285-312
- 5 Francis JT, Quinn TJ, Amann M, Laroche DP. Defining intensity domains from the end power of a 3-min all-out cycling test. *Med Sci Sports Exerc* 2010; 42: 1769-1775
- 6 Gardner AS, Stephens S, Martin DT, Lawton E, Lee H, Jenkins D. Accuracy of SRM and Powertap monitoring systems for bicycling. *Med Sci Sports Exerc* 2004; 36: 1252-1258
- 7 Harriss DJ, Atkinson G. Update - Ethical Standards in Sport and Exercise Science Research. *Int J Sports Med* 2011; 32: 819-821
- 8 Jones AM, Vanhatalo A, Burnley M, Morton RH, Poole DC. Critical Power: Implications for determination of VO_{2max} and exercise tolerance. *Med Sci Sports Exerc* 2010; 42: 1876-1890
- 9 Monod H, Scherrer J. The work capacity of synergy muscular groups. *Ergonomics* 1965; 8: 329-338
- 10 Moritani T, Nagata A, Devries HA, Muro M. Critical power as a measure of physical work capacity and anaerobic threshold. *Ergonomics* 1981; 24: 339-350
- 11 Morton RH, Hodgson DJ. The relationship between power output and endurance: a brief review. *Eur J Appl Physiol* 1996; 73: 491-502
- 12 Peronnet F, Thibault G. Analyse physiologique de la performance en course a pied, révision du modèle hyperbolique. *J Physiol* 1987; 82: 52-60
- 13 Peronnet F, Thibault G. Mathematical analysis of running performance and world running records. *J Appl Physiol* 1989; 67: 453-465

- 14 Pinot J, Grappe F. The power profile to determine the physical capacities of the cyclist. *Comput Meth Biomech Biomed Eng* 2010; 13: 103–104
- 15 Quod MJ, Martin DT, Martin JC, Laursen PB. The power profile predicts Road Cycling MMP. *Int J Sports Med* 2010; 31: 397–401
- 16 Sallet P, Mathieu R, Fenech G, Baverel G. Physiological differences of elite and professional road cyclists related to competition level and rider specialization. *J Sports Med Phys Fitness* 2006; 46: 361–365
- 17 Sassi A, Impellizzeri M, Morelli A, Menaspà P, Rampinini E. Seasonal changes in aerobic fitness indices in elite cyclists. *Appl Physiol Nutr Metab* 2008; 33: 735–742
- 18 Scherrer J, Samson M, Paléologue A. Étude du travail musculaire et de la fatigue. *J Physiol* 1954; 46: 887–916
- 19 Scherrer J, Monod H. Le travail musculaire local et la fatigue chez l'Homme. *J Physiol* 1960; 52: 419–501
- 20 Schumacher YO, Pottgiesser T. Performance profiling: a role for sport science in the fight against doping. *Int J Sports Physiol Perform* 2009; 4: 129–133
- 21 Vanhatalo A, Jones MJ, Burnley M. Application of Critical Power in Sport. *Int J Sports Physiol Perform* 2011; 6: 128–136
- 22 Vogt S, Heinrich L, Schumacher YO, Blum A, Roecker K, Dickhuth HH, Schmid A. Power output during stage racing in professional road cycling. *Med Sci Sports Exerc* 2006; 38: 147–151
- 23 Vogt S, Roecker K, Schumacher YO, Pottgiesser T, Schmid A, Heinrich L. Cadence-power-relationship during decisive mountain ascents at the Tour de France. *Int J Sports Med* 2007; 28: 1–7
- 24 Vogt S, Schumacher YO, Roecker K, Dickhuth HH, Schoberer U, Schmid A, Heinrich L. Power output during the Tour de France. *Int J Sports Med* 2007; 28: 756–761
- 25 Vogt S, Schumacher YO, Blum A, Roecker K, Dickhuth HH, Schmid A, Heinrich L. Cycling power output produced during flat and mountain stages in the Giro d'Italia : a case study. *J Sports Sci* 2007; 25: 1299–1305
- 26 Wilkie DR. Equations describing power input by humans as a function of duration of exercise. In: Cerretelli P, Whipp BJ (eds). *Exercise Bioenergetics and Gas Exchange*. Amsterdam: Elsevier/North Holland Biomedical; 1980; 75–80
- 27 Wooles AL, Robinson AJ, Keen PS. A static method for obtaining a calibration factor for SRM bicycle power cranks. *Sports Engineering* 2005; 8: 137–144

CHAPITRE 3 : Suivi longitudinal du PPR

Les résultats de ce travail ont fait l'objet d'un article publié dans la revue *Journal of Sport Sciences* : « A six-year monitoring case study of a top-10 cycling grand tour finisher » (Pinot et Grappe, 2014).

Résumé détaillé

A six-year monitoring case study of a top-10 cycling grand tour finisher

Pinot J et Grappe F

Etat de l'art : Le monitoring à long terme des performances et de l'entraînement d'athlètes de classe mondiale est relativement rare dans la littérature scientifique. Seules quelques études de cas menées sur plusieurs années ont présenté l'évolution physiologique d'une détentrice du record du monde du marathon (Jones A. M., 1998, 2006) ou encore de champions olympiques et du monde d'aviron (Lacour *et al.*, 2009 ; Mikulic, 2011). En cyclisme, on recense uniquement un article reportant l'amélioration des paramètres physiologiques ($\dot{V}O_{2max}$, rendement...) d'un vainqueur du Tour de France (Coyle, 2005) mais les récents aveux de dopage de ce dernier (Lance Armstrong) remettent en cause la validité de cette étude. En ce qui concerne le suivi de la charge d'entraînement, Rodriguez-Marroyo *et al.* (2012) ont montré avec des cyclistes professionnels que la méthode de Foster *et al.* (2001), à partir de l'évaluation subjective de l'intensité d'effort (RPE), était un moyen valide et fiable de quantification de la charge d'entraînement en cyclisme. A notre connaissance, aucune étude n'a analysé la relation qui peut exister entre la charge d'entraînement et l'amélioration des performances de cyclistes de classe mondiale à partir du suivi des $P_{méca}$ réalisées.

Objectif : L'objectif de cette étude était d'analyser sur une période de 6 ans l'évolution du PPR en relation avec le suivi de la charge d'entraînement d'un cycliste ayant terminé dans le top-10 de grands Tours. De plus, cette étude a l'originalité de présenter les données de $P_{méca}$ d'un cycliste lors de son accession au plus haut niveau mondial, permettant ainsi d'améliorer

les connaissances sur les capacités physiques requises pour finir dans le top 10 des plus grandes courses à étapes du monde.

Méthodes : Le monitoring de l'entraînement d'un cycliste a été réalisé sur 6 années entre 18 et 23 ans, ce qui correspond à son évolution du niveau junior (2008) au plus haut niveau mondial, marqué par des top-10 dans le classement général du Tour de France (2012) et du Tour d'Espagne (2013). Le cycliste a réalisé l'ensemble des entraînements et des compétitions de cette période avec un capteur de puissance SRM. Le PPR du cycliste a été déterminé annuellement afin de suivre l'évolution de son potentiel physique à l'intérieur de 5 zones d'intensité (Pinot J. et Grappe, 2011). Parallèlement, le suivi de la charge d'entraînement a été réalisé à l'aide de la méthode perceptive de Foster et *al.* (2001), via une plateforme web. Il convient de souligner que cette étude ne s'est pas intéressée à la programmation et à la planification de l'entraînement, réalisées par son entraîneur personnel.

Résultats : La charge d'entraînement et le volume total annuel ont augmenté respectivement de 83% (de 159165 à 291608 U.A.) et 79% (de 526 à 943 h) au cours des 6 années (figure 26). Tous les indices d'entraînement hebdomadaires ont augmenté significativement entre 2008 et 2013 (volume, RPE, charge de travail, monotonie et contrainte).

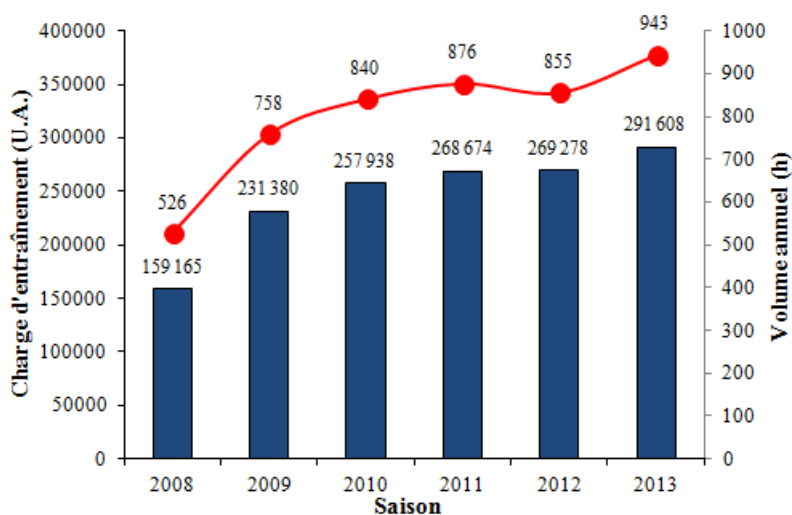


Figure 26 Evolution de la charge d'entraînement annuel (bleu) et volume total (rouge)

Le PPR annuel du cycliste a montré l'évolution des $P_{méca}$ records à l'intérieur de 5 zones d'intensité (figure 27). Dans les zones 4 et 5, les augmentations des $P_{méca}$ records étaient comprises entre 9,7 et 12,6%. Dans les zones 2 et 3, les augmentations des $P_{méca}$ records sont comprises entre 12,5 et 15,4%. Les augmentations étaient plus variables sur les durées d'effort plus longues (plusieurs heures) de la zone 1. Ainsi, les $P_{méca}$ records ont augmenté de 6,9% sur 2 h alors qu'ils ont augmenté de 31,6% sur 4 h.

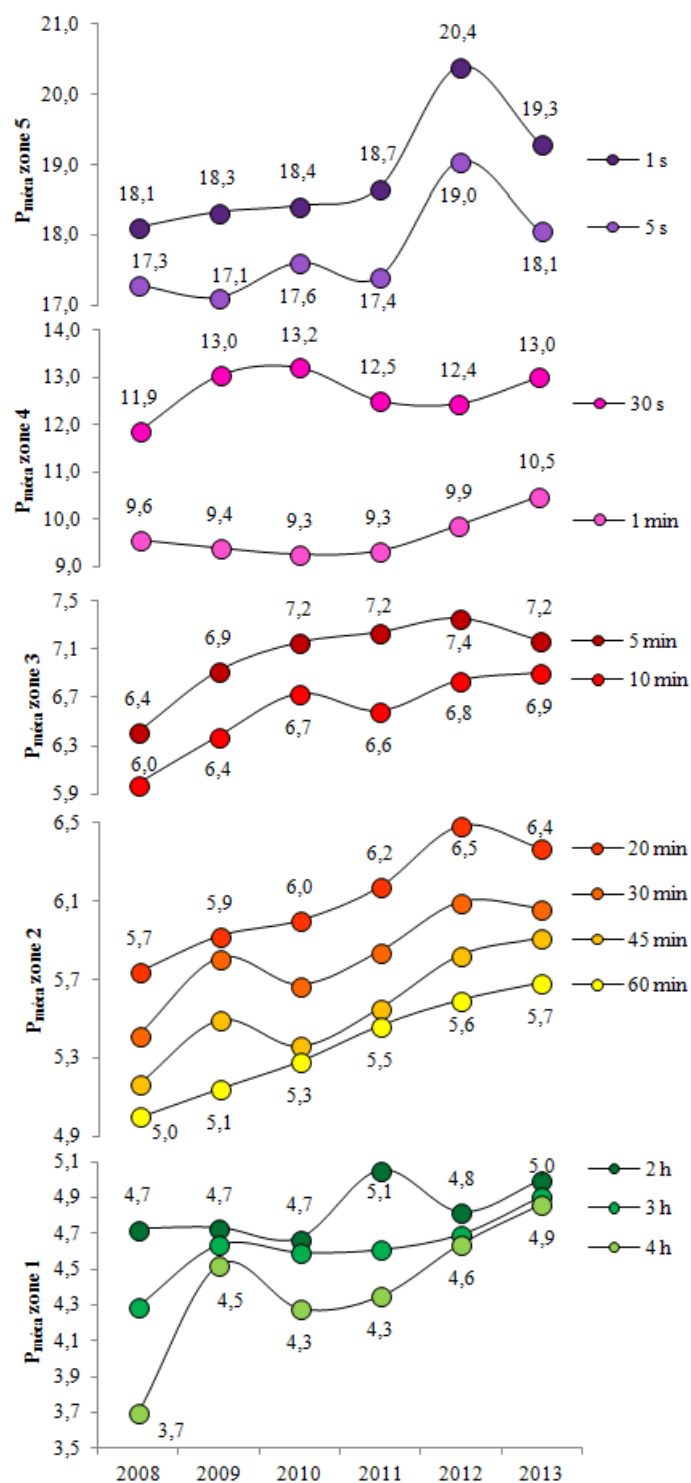


Figure 27 Evolution des $P_{méca}$ records à l'intérieur des 5 zones d'intensité au cours des 6 saisons

L'analyse statistique a montré que l'évolution des indices moyens hebdomadaires de durée, charge d'entraînement, monotonie et contrainte étaient significativement corrélés avec les améliorations des $P_{méca}$ records sur 5, 10, 20, 30, 45, 60, 180 et 240 min.

Discussion : Le résultat principal de cette étude montre que l'augmentation des principaux indices de la charge d'entraînement évalués avec la méthode de Foster *et al.* (2001) au cours des 6 années de suivi était significativement corrélé avec l'amélioration du potentiel aérobie du cycliste, caractérisé par une augmentation des $P_{m\acute{e}ca}$ records comprises entre 5 min et 4h. Cette étude originale apparaît comme la première à décrire l'évolution du niveau de performance requis pour être classé dans le top-10 des grands Tours à partir d'un suivi du PPR.

La quantification de la charge de travail au cours des 6 années a permis de montrer l'augmentation importante de la charge d'entraînement de l'athlète entre la catégorie junior et le plus haut niveau mondial. Cette augmentation progressive associée avec celle des indices de contrainte et de monotonie doit être contrôlée en prévention des phénomènes de « non functional overreaching » et « overtraining » (Foster, 1998). Dans ce sens, la grande variabilité de la charge de travail entre les cycles d'entraînement observé chez le sujet peut témoigner d'un modèle d'entraînement dynamique qui permet en partie d'éviter de basculer dans le surentraînement.

En effet, nous avons observé en parallèle de l'amélioration de ses résultats en compétition, une augmentation de l'ensemble des $P_{m\acute{e}ca}$ records dans les différentes zones d'intensité entre 2008 et 2013. Le profil de performance de ce cycliste correspond à celui d'un grimpeur, puisque les niveaux de $P_{m\acute{e}ca}$ records sur des durées comprises entre 5 min et 1h le confirment. Les valeurs de $P_{m\acute{e}ca}$ records dans les zones 2 et 3 représentatives du type d'effort intense réalisé dans les montées de cols étaient supérieures à celles rapportées dans les études précédentes donnant des mesures de $P_{m\acute{e}ca}$ en compétition (Ebert *et al.*, 2006 ; Vogt *et al.*, 2007 ; Vogt *et al.*, 2007 ; Vogt *et al.*, 2008 ; Nimmerichter *et al.*, 2010 ; Quod *et al.*, 2010). C'est également dans ces zones d'intensité que l'amélioration moyenne des $P_{m\acute{e}ca}$ records a été la plus importante avec un gain significatif de 14% entre 18 et 23 ans. Cependant, l'amélioration tendait à ralentir au cours des deux dernières années du suivi, ce qui peut être mis en lien avec des études précédentes montrant une évolution de la $\dot{V}O_{2max}$ chez les athlètes de haut niveau atteignant son pic vers 22 ans (Rusko, 1992 ; Jones S. et Passfield, 1998 ; Messonnier *et al.*, 1998 ; Mikulic, 2011).

Ces résultats confirment que le PPR est un concept pertinent pour mettre en valeur les capacités physiques des cyclistes et suivre leur évolution sur le long terme.

Conclusion : Cette étude de cas présente l'évolution physiologique d'un cycliste de classe mondiale à partir d'un monitoring de la $P_{méca}$ de ses performances et paramètres d'entraînement. La détermination et le suivi du PPR de cet athlète sur 6 années permet d'illustrer la progression de son potentiel physique avec en prime, l'accession dans le top 10 du Tour de France et du Tour d'Espagne à seulement 23 ans. Cette étude montre comment il est possible d'utiliser la mesure de la $P_{méca}$ et de différents indices perceptifs pour optimiser le processus de suivi de l'entraînement en cyclisme.

A six-year monitoring case study of a top-10 cycling Grand Tour finisher

JULIEN PINOT^{1,2} & FREDERIC GRAPPE^{1,2}

¹Health & Sport Department, University of Franche-Comte, EA 4660, Culture – Sport – Health – Society (C3S), Besancon, France and ²FDJ.fr Professional Cycling Team, Moussey le Vieux, France

(Accepted 20 September 2014)

Abstract

This study analysed the evolution of the physical potential of a twice top-10 Grand Tour cycling finisher (Tour de France and Vuelta a España) whose training was monitored between the ages of 18 and 23 years. The world-class cyclist's power output (PO) data and training indices were analysed over six years to determine the evolution of his record power profile and training load (TL), which were estimated by using the session rating of perceived exertion (RPE) method. The total annual duration and TL increased through six seasons by 79% and 83%, respectively. The record POs in all exercise intensity zones improved over the six years. The increases in TL, monotony (+34%) and strain (+162%) from the junior category to the world-class level significantly correlated with an improvement in his aerobic potential, which was characterised by an increase in the record POs between 5 min and 4 h. This case study of the performance level and training parameters of a world-class cyclist provides comprehensive insight into the evolution of a cyclist to the top level. Furthermore, determining the record power profile of this athlete over six competitive seasons illuminates the maturation of the physical potential of a top-10 Grand Tour finisher.

Keywords: performance, elite cycling, training load, power output, physical potential

Introduction

Long-term monitoring of training and performance data of world-class athletes is rare. As noted by Mikulic (2011), the rarity seems to be due to both limited access to elite athletes and the finite nature of the population. A few multiyear case studies described physiological changes in high-level athletes, including a female marathon world record holder (Jones, 1998, 2006), several Olympic and world champion rowers (Lacour, Messonnier, & Bourdin, 2009; Mikulic, 2011), a Tour de France cycling race winner (Coyle, 2005) and a top-level soccer referee (Weston et al., 2011). These case studies observed changes in performance and physiological parameters, such as maximal oxygen uptake ($\dot{V}O_2$ max), which is generally considered the most important physiological measure in the assessment of potential for endurance exercise. Among these previous studies, only two provided insights into physiological and performance improvements that lead to the elite status of the athlete (Coyle, 2005; Mikulic, 2011). Unfortunately, the scientific validity of Coyle's

study cannot be confirmed because of the subsequent confession of doping by the studied athlete (Lance Armstrong). To the best of our knowledge, no study has analysed the relationship between training load (TL) and improvement in the physical potential of a top-10 Grand Tour finisher.

In cycling, analysis of the power output (PO) provides a more valuable and relevant method for quantifying the TL and cycling performance than oxygen consumption (Bishop, Jenkins, & Mackinnon, 1998; Jobson, Passfield, Atkinson, Barton, & Scarf, 2009; Lucia et al., 2004; Nevill, Jobson, Davison, & Jeukendrup, 2006). PO is becoming a widely recognised biomechanical variable of performance because it is measured directly on the bicycle during training and competition. Moreover, the PO during competition is a reliable way of assessing physical potential (Bosquet, Leger, & Legros, 2002). Monitoring changes in the record POs over several years can be used to determine the record power profile and peak performance level of a cyclist (Pinot & Grappe, 2011). The record power profile is the relationship between different sequential records of PO, obtained during training and

competitions, and the corresponding time durations between 1 s and 4 h (Pinot & Grappe, 2011). The record power profile changes in successive years can be used to track progress in all physical abilities specific to cycling.

In conjunction with tracking physical performance progress, monitoring of the TL is important to optimise performance. Different methods exist to quantify the TL of cyclists, from heart rate measurements, PO data and psychobiological indices, such as the rating of perceived exertion (RPE) (Jobson et al., 2009). Rodriguez-Marroyo et al. (2012) showed that the session RPE method, proposed by Foster et al. (2001), appears to be a valid and reliable technique for monitoring the TL in cycling. Although it is an easy and non-invasive tool for coaches to quantify the physiological load, the scientific literature lacks multiyear TL monitoring of high-level cyclists that would provide insight into the training process needed to reach the top level.

The purpose of the current study was to analyse the evolution of POs in the different exercise intensity zones of a twice top-10 Grand Tour cycling finisher (Tour de France and Vuelta a España) based on TL monitoring, between the ages of 18 and 23 years when he reached the top level. The Tour de France, the most famous cycling race in the world, has already been the main topic of several publications (Vogt, Schumacher, Roecker et al., 2007; Vogt et al., 2008). The present study can expand on the knowledge base of the physical abilities required to finish in the top-10 of this world-class event.

Methods

Participant

The participant provided written informed consent for his POs and TL data to be used in this case study, which was approved by a local ethics committee that complies with the international ethical standards described by the Declaration of Helsinki. Born in 1990, the cyclist's height is 1.80 m, and his optimal body mass, measured from his mean body mass during the periods of goal races, increased from 62 kg (2008) to 65 kg (2012–2013). During the preparatory period for the 2013 season, his $\dot{V}O_2$ max was $5.55 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ ($85 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$) according to an incremental test performed in a medical centre. The ramp test ($25 \text{ W} \cdot \text{min}^{-1}$) was performed on an electrically braked cycle ergometer (Monark 839E, Stockholm, Sweden), and the ventilatory exchanges were measured with a K4b2 breath-by-breath portable gas analyser (COSMED, Rome, Italy). He began cycling competitively when he was eight years old. He started competing at the international level in 2008 in the under-19 category. In 2010, he turned

professional by joining a World Tour cycling team after only one year in the under-23 category and became the youngest winner of a prestigious mountainous stage race, the "Giro of Valle d'Aosta." Categorised as a stage race cyclist and a world-class climber, this athlete's rankings in the overall classifications of stage races (from six days to three weeks) have progressively improved since turning professional. In 2012, he became the youngest cyclist to finish in the top-10 of the Tour de France since 1947. His results continued to improve in 2013 by placing in the top-10 of several World Tour one-week and three-week stage races. He came fourth in the Tour of Switzerland, eighth in the Tour of Catalonia and seventh in the Vuelta a España.

We did not alter the original training program planned by the cyclist's coach, who used the TL indices to elaborate it. With training and competition, he cycled between 14,733 km (2008) and 29,383 km (2013) per season. Most of the competitive seasons adopted the same model, outlined below:

1. A preparatory period of approximately 12 weeks, which included basic and foundation training (general physical preparation, cycling workouts at low to moderate intensities and strength training). During this period, non-cycling activities comprised 30–40% of total training time, while cycling activities (road cycling, mountain bike and cyclo-cross) represented the remaining 60–70%.
2. A competitive period divided into three macrocycles, each of which featured a specific period with the aim of improving his peak performance level. These consisted of five to six weeks of cycling workouts, mixing high-volume and high-intensity training with races used as training; two to three weeks of goal races, with tapering before and between the races; followed by one to two weeks of recovery. During the competitive period, training was exclusively comprised of road cycling workouts.
3. A rest period of between four and six weeks.

SRM measurements

The cyclist performed all training sessions and competitions over the six-year period from 2008 to 2013 with a mobile power meter mounted on his road bike (SRM Professional Training systems, Schoberer Rad Messtechnik, Jülich, Germany). He was instructed on the use of the SRM PowerControl (bike computer) and informed of the importance of performing the zero offset frequency procedure to obtain

accurate PO data (Abbiss, Quod, Levin, Martin, & Laursen, 2009; Gardner et al., 2004). According to the manufacturer's recommendations, the calibration slope of the SRM was checked three times during each season using a static calibration to determine the relationship between the torque (Nm) and frequency (Hz) (Woolles, Robinson, & Keen, 2005). Data were sampled at 1 Hz. Throughout the six-year period, each of his road bikes was equipped with an SRM power meter. Data were not sampled over two periods of two weeks in 2009 and 2010 due to SRM breakdown.

SRM data analysis

After each training session and competition, the cyclist transferred his data from the power control to a web server (velobook.net, Velobook, Anglet, France). After downloading his files from the server, the data were screened in order to exclude the files that were erroneous. Possible errors occurred due to artefacts, incorrect calibrations, speed sensor defaults that falsified the average PO and waves of television motorcycles in some races which interfered with the power meter signal. Of the SRM files, 95% were considered valid and were subsequently analysed using TrainingPeaks software (WKO+, v3.0, Peakware, CO, USA) in order to identify the cyclist's maximal mean power in each SRM file. The various record POs corresponded to the highest mean maximal powers developed each year by the cyclist on durations of 1, 5, 30 and 60 s and 5, 10, 20, 30, 45, 60, 120, 180 and 240 min. The term "record power output" is preferred instead of "maximal power output" because we consider that the highest PO obtained during competition and training, that is, the highest PO developed by the cyclist, is not the maximum that can be achieved by the athlete. The cyclist's record power profile was determined for each competitive season (from 2008 to 2013) from the relationship between the 13 highest record POs and the different durations. The PO in the record power profile was expressed in relation to the cyclist's body mass ($W \cdot \text{kg}^{-1}$) according to the methodology of Pinot and Grappe (2011).

The exercise intensity zones were defined as described by Pinot and Grappe (2011) in order to analyse the skills of the cyclist according to the levels of POs in different exercise intensity domains (Pinot & Grappe, 2011): zone 1, moderate exercise intensity (record POs between 1 and 4 h); zone 2, heavy exercise intensity (record POs between 20 and 60 min); zone 3, low part of the severe intensity zone (record POs between 5 and 20 min); zone 4, high part of the severe intensity zone (record POs between 30 s and 5 min); and zone 5, force-velocity (record POs between 1 and 30 s).

Quantification of internal training load

The internal TL was determined by multiplying the training duration (min) by the session RPE as described by Foster et al. (2001). After each training session and competition, the cyclist was asked to rate the intensity of the whole session on the 10-RPE scale, modified by Foster et al. (2001), before uploading the SRM file to the web server. Prior to using the web server, the athlete was familiarised with the scale for rating perceived exertion. The "strain" and "monotony" were calculated in accordance with the method of Foster et al. (2001). The monotony index characterises the variability of training and was calculated weekly by dividing the weekly mean TL by the standard deviation. It allows to follow the training variability over the weeks. The product of the overall weekly TL by the monotony index corresponds to the index of strain. It is important to monitoring the strain because excessive training strain has shown to be related to overtraining and illness (Foster, 1998).

Statistics

Statistical analysis was performed using SigmaPlot 12.0 software (Systat Inc., San Jose, USA). Descriptive statistics were used, and all data were expressed as mean \pm standard deviation with coefficient of variation (CV). Pearson's zero-order correlation coefficients were computed by the least squares method to describe the relationship between selected variables.

A non-parametric Kruskal-Wallis test was used to analyse the differences in the weekly TL, duration, monotony and strain according to the season. When a significant effect was detected, a post hoc comparison was made using Dunn's test. Statistical significance was set at $P < 0.05$.

Results

In total, 2208 sessions were analysed during the six-year study period from 2008 to 2013. These sessions were divided into 1727 workouts and 481 competitions (including 68 time trials). Figure 1 shows that the total annual duration and TL increased over the six seasons by 79% (from 526 h to 943 h) and 83% (from 159,165 Arbitrary Unit (AU) to 291,608 AU), respectively. The increases in the total annual duration and TL were quite substantial (+60% and +62%, respectively) between the ages of 18 and 20 years, becoming more moderate (less than 10% each year) when the athlete turned professional in 2010.

All the weekly training indices increased significantly ($P < 0.05$) between the six competitive

4 J. Pinot & F. Grappe

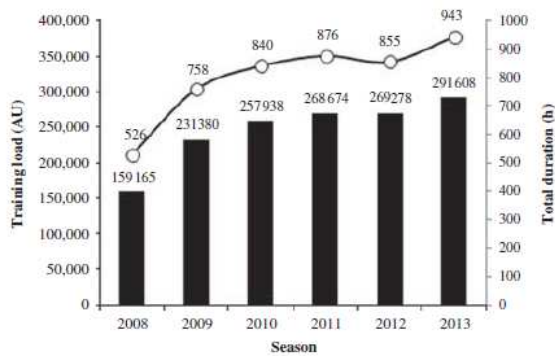


Figure 1. Changes in the annual training load (black bar) and total duration (white circle) (AU: Arbitrary Unit).

seasons with only significant differences between 2008 and all the other seasons (Table I). The mean weekly duration and the TL increased by +79.2% and 83.2%, respectively. The highest values of the mean weekly duration (18.1 h), TL (5608 AU) and strain (9148 AU) were reached in 2013, whereas the highest mean weekly monotony (1.32 AU) was reached in 2012. The monotony and strain indices increased by 36.1% and 162.1%, respectively, with higher coefficients of variation in the last two seasons (74% and 54% for monotony and 87% and 135% for strain). The maximal weekly RPE of each season increased by 28.1% from 5.7 AU (in 2008) to 7.3 AU (in 2012). Moreover, the number of weeks with a high-mean RPE (between 5 and 8 AU) increased from 4 (in 2009) to 11 (in 2012 and 2013).

Figure 2 shows the changes in the record POs for the six competitive seasons within the different exercise intensity zones from the annual record power profile of the cyclist. The changes in the record POs differed according to the exercise intensity zones. In zone 5, the record POs on 1 and 5 s increased slightly during the first four years of the monitoring, before reaching a peak level in 2012. During the following year, these record POs decreased but were greater than in 2011. In zone 4, the record PO on 30 s oscillated between 11.9 and 13.2 $W \cdot kg^{-1}$, whereas the record PO on 1 min

peaked at 10.5 $W \cdot kg^{-1}$ in 2013. In zones 2 and 3, the majority of the record POs increased progressively between 2008 and 2012. Between 2012 and 2013, some record POs were slightly higher (10, 45 and 60 min) and others were lower (5, 20 and 30 min) in 2013, but the differences were never greater than 0.1 $W \cdot kg^{-1}$. Further, between 2009 and 2013, the record POs within zone 1 showed stochastic evolution, with the best performance level reached in 2013 for 3- and 4-h durations.

Table II shows the improvements in the different record POs between the first year of monitoring and the year where the maximal annual record PO was reached. The highest improvement was on 4 h, with an increase of 31.6% between 2008 and 2013. The lowest increase was on 2 h, with an increase of 6.9% between 2008 and 2011. Otherwise, all the record POs between 5 and 60 min increased between 12.5% and 15.4%.

Table III shows that the evolution of the mean weekly training duration, TL, monotony and strain are positively correlated with the improvement in the record POs on 5, 10, 20, 30, 45, 60, 180 and 240 min. The mean weekly RPE was correlated with the changes in the record POs on 30 s and on 5, 10, 30, 180 and 240 min.

Discussion

This case study used training monitoring to analyse the six-year evolution of PO in the different exercise intensity zones of a cyclist who finished twice in the top-10 overall classification of Grand Tours at the age of 23 years. Cycling Grand Tours (Tour de France, Vuelta a España and Giro d'Italia) are extreme endurance events, with the athlete covering approximately 3500 km in 21 stages over three weeks. The overall classification of these races is usually decided in mountain ascents and time trials. Some studies have presented PO data of Grand Tours (Vogt, Schumacher, Blum, et al., 2007; Vogt, Schumacher, Roecker, et al., 2007; Vogt et al., 2008) or PO distributions from a one-year

Table I. Changes in the mean weekly duration, RPE, training load (TL), monotony and strain from 2008 to 2013. The values are expressed as mean \pm SD (CV) (AU: Arbitrary Unit).

| Season | Duration (h) | RPE (AU) | TL (AU) | Monotony (AU) | Strain (AU) |
|--------|-----------------------|-----------------------|------------------------------------|------------------------|--------------------------|
| 2008 | 10.1* \pm 5.3 (53%) | 3.22 \pm 1.51 (47%) | 3061* \pm 1698 (55%) | 0.97* \pm 0.44 (45%) | 3490* \pm 2315 (66%) |
| 2009 | 14.3* \pm 5.9 (41%) | 3.64 \pm 1.46 (40%) | 4366 [#] \pm 2208 (51%) | 1.20 \pm 0.53 (44%) | 5909 \pm 4144 (70%) |
| 2010 | 16.1 \pm 6.5 (40%) | 3.60 \pm 1.49 (42%) | 4960 \pm 2541 (51%) | 1.20 \pm 0.54 (45%) | 6978 \pm 5740 (82%) |
| 2011 | 16.9 \pm 7.3 (43%) | 3.57 \pm 1.54 (43%) | 5167 \pm 2750 (53%) | 1.23 \pm 0.62 (51%) | 7603 \pm 6631 (87%) |
| 2012 | 16.4 \pm 8.0 (49%) | 3.59 \pm 1.81 (51%) | 5178 \pm 3204 (62%) | 1.32 \pm 0.98 (74%) | 8935 \pm 12,092 (135%) |
| 2013 | 18.1 \pm 8.1 (45%) | 3.70 \pm 1.71 (46%) | 5608 \pm 3254 (58%) | 1.30 \pm 0.71 (54%) | 9148 \pm 9293 (102%) |

Notes: * significant difference between all seasons ($P < 0.05$), [#] significant difference with 2008 and 2013 seasons, * significant difference with 2008, 2011 and 2013 seasons.

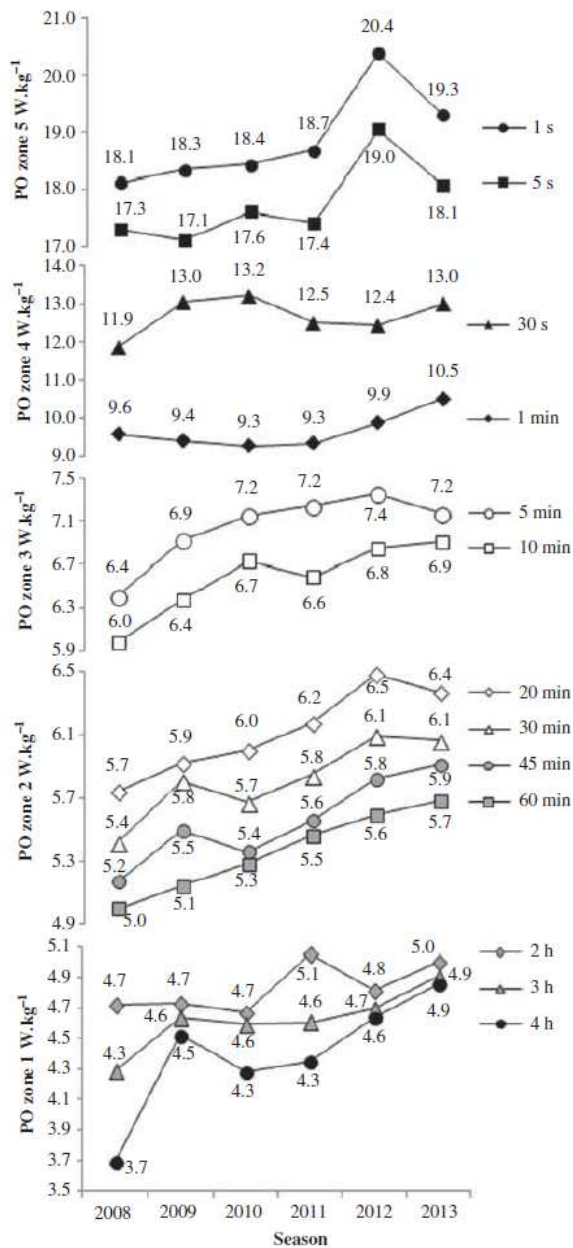


Figure 2. Changes in the different record power outputs (PO) throughout the six competitive seasons within the five exercise intensity zones.

follow-up of world-class cyclists (Nimmerichter, Eston, Bachl, & Williams, 2011), but none have reported the POs of a cyclist in contention for a high overall ranking. Moreover, there are few long-term monitoring studies of the performance and training of world-class endurance athletes, as mentioned by Lacour et al. (2009). This study is the first to describe the performance level required for ranking in the top-10 of cycling Grand Tours. It includes

Table II. Improvements in the different record power outputs (PO) between the first season in the junior category (2008) and the maximal values.

| Duration | Record PO gain (%) | Season |
|----------|--------------------|--------|
| 1 s | 12.6 | 2012 |
| 5 s | 10.1 | 2012 |
| 30 s | 11.3 | 2010 |
| 1 min | 9.7 | 2013 |
| 5 min | 14.7 | 2012 |
| 10 min | 15.4 | 2013 |
| 20 min | 13.0 | 2012 |
| 30 min | 12.5 | 2013 |
| 45 min | 14.3 | 2013 |
| 1 h | 13.7 | 2013 |
| 2 h | 6.9 | 2011 |
| 3 h | 14.4 | 2013 |
| 4 h | 31.6 | 2013 |

data on the athlete's record power profile and the evolution of his training parameters between the junior category and world-class level.

The main finding of this study was that increases in the TL, monotony and strain from the junior category to the world-class level were significantly correlated with improvement in the aerobic potential of the cyclist characterised by an increase in the record POs between 5 min and 4 h. The record POs in all exercise intensity zones improved over these six years of training. The high $\dot{V}O_2$ max of the cyclist demonstrates his huge endurance capability. The $\dot{V}O_2$ max trainability is determined by both genes and the environment (Tucker & Collins, 2012), and approximately 50% of these two $\dot{V}O_2$ max traits are heritable (Bouchard et al., 2000). As Tucker and Collins (2012) suggested, elite sporting performance is the result of the interaction between genetic and training factors. Thus, both the talent identification and management systems to facilitate optimal training are crucial to sporting success. The athlete in the present study had the opportunity to evolve during the six seasons within well-structured cycling teams.

Programming the TL is very important to enhance the athlete's performance, and hence the necessity to quantify it. As demonstrated by Rodriguez-Marroyo et al. (2012), the session-RPE method, proposed by Foster et al. (2001) and representative of the combined intensity and duration of training sessions, is a valid method for quantifying and monitoring the TL in cycling. The follow-up of the world-class cyclist showed that his session RPE TL progressively increased over the six-year period. The annual training duration increased by 79% (from 525 h in 2008 to 942 h in 2013), with the mean weekly duration increasing from 10.1 h in the junior category to 18.1 h in his fourth professional season, while at

Table III. Correlations between the evolution of the different record power outputs (POs) and the mean weekly training indices during the six-year follow-up. The Pearson coefficients were expressed when a correlation was significant.

| Record PO | 1 s | 5 s | 30 s | 1 min | 5 min | 10 min | 20 min | 30 min | 45 min | 60 min | 120 min | 180 min | 240 min |
|-----------|-----|-----|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| Duration | NS | NS | NS | NS | 0.93** | 0.95** | 0.82* | 0.83* | 0.81* | 0.89* | NS | 0.90* | 0.86* |
| RPE | NS | NS | 0.84* | NS | 0.82* | 0.84* | NS | 0.80* | NS | NS | NS | 0.91** | 0.93** |
| TL | NS | NS | NS | NS | 0.94** | 0.96** | 0.84* | 0.86* | 0.83* | 0.90* | NS | 0.90* | 0.87* |
| Monotony | NS | NS | NS | NS | 0.94** | 0.94** | 0.90* | 0.95** | 0.90* | 0.89* | NS | 0.90* | 0.94** |
| Strain | NS | NS | NS | NS | 0.93** | 0.96** | 0.95** | 0.93** | 0.92** | 0.96** | NS | 0.90* | 0.89* |

Notes: * significant correlation with $P < 0.05$, ** significant correlation with $P < 0.01$, NS: non-significant

the same time, the mean weekly RPE remained stable. His mean weekly TL evolved from 3061 AU to 5608 AU (+83%). The changes of category, associated with his rise to the professional level, can easily explain the strong increase during the first three years (+62%). However, the TL continued to increase until 2013, although it slowed down (+9%) between 2011 and 2013. Therefore, the physical potential of the athlete improved simultaneously with the evolution of the training parameters. Indeed, the evolution of the TL, monotony and strain was significantly correlated with the improvement in the athlete's aerobic ability, whereas this is not the case for the stochastic evolution of his anaerobic potential. It should be noted that this cyclist has focused his training on the development of his main strengths since he was in the junior category with endurance workouts and specific intervals spent in zones 2–3 in ascents. The risk associated with the increased TL is that the athlete goes into non-functional overreaching and overtraining syndromes. Other training data, such as monotony and strain indices, obtained from the TL can be used to follow the adaptation to long-term training and avoid non-functional overreaching or overtraining (Foster, 1998). Thus, the evolution of the TL is associated with that of monotony and strain, but the increase in the CV shows the high variability of the training, notably in the last two years. This variability associated with the increase in the number of weeks at mean high intensity (RPE between 5 and 8 AU) is indicative of the dynamic model of training performed by this athlete.

Monitoring the record power profile through six competitive seasons showed the improvement in the physical potential of this world-class cyclist. It should be noted that the improvements in the different record POs were higher when the PO was expressed as the absolute PO (W) because of the increase in the optimal body mass of the athlete during the study period (+3 kg in five years). However, the increases in the record POs varied according to the different exercise intensity zones. This confirms that the record power profile can yield relevant data on improvements in the cyclist's

capacities (Pinot & Grappe, 2011) and that data obtained during competition are relevant and valuable in the assessment of physical potential. As explained by Sassi, Marcora, Rampinini, Moggi, and Impellizzeri (2006) and Lamberts, Rietjens, Tjeldink, Noakes, and Lambert (2010), maximal exhaustion tests are generally disruptive and not well accepted by high-level athletes during periods of training, especially when they are close to important competitions.

The follow-up of the record POs can be used to assess the cyclist's improvements in physical skills within the different exercise intensity zones. Within the force-velocity zone, the cyclist's record POs improved progressively on 1 and 5 s during the first four years of the monitoring, before reaching a peak level in 2012, with increases of 12.6% and 10.1%, respectively, compared to 2008. These record POs were realised during the season when he focused intensively on sprint qualities. During the following year, the record POs decreased, but were still greater than in 2011 (+3.5%).

In the high part of the severe intensity zone, the record POs on 30 and 60 s oscillated during the six seasons within a narrow range of $0.8 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $1.1 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. The performance at maximal effort of short durations reflects the cyclist's anaerobic capacity, which corresponds to his major physical weakness. The record POs ($13.2 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ on 30 s and $10.5 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ on 1 min) do not constitute a high peak performance compared to maximal field POs reported in previous studies (Ebert et al., 2006; Pinot & Grappe, 2011; Quod, Martin, Martin, & Laursen, 2010; Vogt, Schumacher, Roecker et al., 2007; Vogt et al., 2008). This shows that the high part of the severe intensity zone is the least improved physical capacity (+11.3% on 30 s and +9.7% on 1 min).

Conversely, the record POs within the heavy intensity zone 2 and the low part of the severe intensity zone 3 express the major strength of the athlete and correspond to his aerobic power ability. Several studies have shown correlations between aerobic physiological variables, such as $\dot{V}O_2$ max, lactate and ventilatory thresholds and cycling performance

between 4 and 60 min (Bentley, McNaughton, Thompson, Vleck, & Batterham, 2001; Coyle et al., 1991; Nimmerichter, Williams, Bachl, & Eston, 2010). Thus, the record PO values of the cyclist measured at $7.4 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ on 5 min, $6.5 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ on 20 min, $6.1 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ on 30 min and $5.7 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ on 1 h represent the highest field PO values when compared to those reported in the scientific literature (Nimmerichter et al., 2010; Pinot & Grappe, 2011; Quod et al., 2010; Vogt, Schumacher, Roecker et al., 2007; Vogt et al., 2008). They characterise a high level of aerobic power ability. As demonstrated by Pinot and Grappe (2011), among cyclists, climbers have the highest record POs within zones 2 and 3 when the PO is normalised relative to their body mass. The record POs of the cyclist within zones 2 and 3 progressively improved, with a mean gain of 14% between the ages of 18 and 23 years. It increased between 2008 and 2009 by 6%, on average, and then by 2.5% annually until 2012. Since 2012, the improvement seemed to slow down. Therefore, the observed improvements seem to be in agreement with previous studies, which showed that the evolution of the $\dot{V}O_2$ max in some high-level athletes peaked when they reached 20–22 years of age but could slightly increase over several years in other athletes (Jones, 1998; Messonnier, Bourdin, & Lacour, 1998; Mikulic, 2011; Rusko, 1992).

Finally, the record POs between 1 and 4 h in the moderate exercise intensity zone also improved over the six years before reaching a peak level in 2013. Their evolution showed a limit in the estimation procedure of the record power profile because it requires the cyclist to achieve maximal effort on each duration between 1 s and 4 h. This is why the record PO on 2 h only increased by 6.9% and the record PO on 4 h improved by 31.6%, because competitions are less than 4 h in duration in the junior category.

Conclusion

This case study provides comprehensive insight into the evolution of a world-class cyclist from maturation to the top level by monitoring his performance and training parameters. The determination of the record power profile of this athlete over six competitive seasons illustrates the physical potential of a cyclist who finished several times in the top-10 overall ranking of Grand Tours. The follow-up of the different TL indices and annual record POs provides information on the improvement in the physical capacities specific to cycling. In the dynamic model of training undertaken by this athlete over the six years, the evolution in the TL (from the increase in both the duration of weekly training sessions and the

number of weeks at high intensity) and strain was correlated with an improvement in aerobic ability. This study provides a real example of how PO data and perception indices of training stress can be used to monitor training and aid the progression of an athlete to a top-class level.

Acknowledgements

The authors would like to thank the participating cyclist for his cooperation.

Funding

This study was supported by the FDJ.fr Pro Cycling Team.

References

- Abbiss, C. R., Quod, M. J., Levin, G., Martin, D. T., & Laursen, P. B. (2009). Accuracy of the Velotron ergometer and SRM power meter. *International Journal of Sports Medicine*, *30*(2), 107–112. doi:10.1055/s-0028-1103285
- Bentley, D. J., McNaughton, L. R., Thompson, D., Vleck, V. E., & Batterham, A. M. (2001). Peak power output, the lactate threshold, and time trial performance in cyclists. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, *33*(12), 2077–2081.
- Bishop, D., Jenkins, D. G., & Mackinnon, L. T. (1998). The relationship between plasma lactate parameters, W_{peak} and 1-h cycling performance in women. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, *30*(8), 1270–1275.
- Bosquet, L., Leger, L., & Legros, P. (2002). Methods to determine aerobic endurance. *Sports Medicine*, *32*(11), 675–700.
- Bouchard, C., Rankinen, T., Chagnon, Y., Rice, T., Perusse, L., Gagnon, J., & Rao, D. (2000). Genomic scan for maximal oxygen uptake and its response to training in the HERITAGE Family Study. *Journal of Applied Physiology*, *88*(2), 551–559.
- Coyle, E. F. (2005). Improved muscular efficiency displayed as Tour de France champion matures. *Journal of Applied Physiology*, *98*(6), 2191–2196. doi:10.1152/jappphysiol.00216.2005
- Coyle, E. F., Feltner, M. E., Kautz, S. A., Hamilton, M. T., Montain, S. J., Baylor, A. M., ... Petrek, G. W. (1991). Physiological and biomechanical factors associated with elite endurance cycling performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, *23*(1), 93–107.
- Ebert, T. R., Martin, D. T., Stephens, B., & Withers, R. T. (2006). Power output during a professional men's road-cycling tour. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, *1*(4), 324–335.
- Foster, C. (1998). Monitoring training in athletes with reference to overtraining syndrome. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, *30*(7), 1164–1168.
- Foster, C., Florhaug, J. A., Franklin, J., Gottschall, L., Hrovatin, L. A., Parker, S., & Dodge, C. (2001). A new approach to monitoring exercise training. *Journal of Strength and Conditioning Research/National Strength & Conditioning Association*, *15*(1), 109–115.
- Gardner, A. S., Stephens, S., Martin, D. T., Lawton, E., Lee, H., & Jenkins, D. (2004). Accuracy of SRM and power tap power monitoring systems for bicycling. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, *36*(7), 1252–1258.
- Jobson, S. A., Passfield, L., Atkinson, G., Barton, G., & Scarf, P. (2009). The analysis and utilization of cycling training data.

- Sports Medicine*, 39(10), 833–844. doi:10.2165/11317840-000000000-00000
- 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. (2006). The physiology of the world record holder for the women's marathon. *International Journal of Sports Science and Coaching*, 1(2), 101–116.
- Lacour, J.-R., Messonnier, L., & Bourdin, M. (2009). Physiological correlates of performance. Case study of a world-class rower. *European Journal of Applied Physiology*, 106(3), 407–413. doi:10.1007/s00421-009-1028-3
- Lamberts, R. P., Rietjens, G. J., Tijdink, H. H., Noakes, T. D., & Lambert, M. I. (2010). Measuring submaximal performance parameters to monitor fatigue and predict cycling performance: A case study of a world-class cyclo-cross cyclist. *European Journal of Applied Physiology*, 108(1), 183–190. doi:10.1007/s00421-009-1291-3
- Lucia, A., Hoyos, J., Perez, M., Santalla, A., Eamest, C. P., & Chicharro, J. L. (2004). Which laboratory variable is related with time trial performance time in the Tour de France? *British Journal of Sports Medicine*, 38, 636–640.
- Messonnier, L., Bourdin, M., & Lacour, J. (1998). Influence de l'âge sur différents facteurs déterminants de la performance sur ergomètre aviron. *Science and Sports*, 13(6), 293–294. doi:10.1016/s0765-1597(99)80011-2
- Mikulic, P. (2011). Maturation to elite status: A six-year physiological case study of a world champion rowing crew. *European Journal of Applied Physiology*, 111(9), 2363–2368. doi:10.1007/s00421-011-1870-y
- Nevill, A. M., Jobson, S. A., Davison, R. C., & Jeukendrup, A. E. (2006). Optimal power-to-mass ratios when predicting flat and hill-climbing time-trial cycling. *European Journal of Applied Physiology*, 97(4), 424–431. doi:10.1007/s00421-006-0189-6
- Nimmerichter, A., Eston, R. G., Bachl, N., & Williams, C. (2011). Longitudinal monitoring of power output and heart rate profiles in elite cyclists. *Journal of Sports Sciences*, 29(8), 831–839.
- Nimmerichter, A., Williams, C., Bachl, N., & Eston, R. (2010). Evaluation of a field test to assess performance in elite cyclists. *International Journal of Sports Medicine*, 31(3), 160–166.
- Pinot, J., & Grappe, F. (2011). The record power profile to assess performance in elite cyclists. *International Journal of Sports Medicine*, 32(11), 839–844.
- Quod, M. J., Martin, D. T., Martin, J. C., & Laursen, P. B. (2010). The power profile predicts road cycling MMP. *International Journal of Sports Medicine*, 31(6), 397–401.
- Rodríguez-Marroyo, J. A., Villa, G., García-López, J., & Foster, C. (2012). Comparison of heart rate and session rating of perceived exertion methods of defining exercise load in cyclists. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 26(8), 2249–2257. doi:10.1519/JSC.0b013e31823a4233
- Rusko, H. K. (1992). Development of aerobic power in relation to age and training in cross-country skiers. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 24(9), 1040–1047.
- Sassi, A., Marcora, S. M., Rampinini, E., Mognoni, P., & Impellizzeri, F. M. (2006). Prediction of time to exhaustion from blood lactate response during submaximal exercise in competitive cyclists. *European Journal of Applied Physiology*, 97(2), 174–180.
- Tucker, R., & Collins, M. (2012). What makes champions? A review of the relative contribution of genes and training to sporting success. *British Journal of Sports Medicine*, 46(8), 555–561. doi:10.1136/bjsports-2011-090548
- Vogt, S., Roecker, K., Schumacher, Y. O., Pottgiesser, T., Dickhuth, -H.-H., Schmid, A., & Heinrich, L. (2008). Cadence-power-relationship during decisive mountain ascents at the Tour de France. *International Journal of Sports Medicine*, 29(3), 244–250.
- Vogt, S., Schumacher, Y. O., Blum, A., Roecker, K., Dickhuth, -H.-H., Schmid, A., & Heinrich, L. (2007). Cycling power output produced during flat and mountain stages in the Giro d'Italia: A case study. *Journal of Sports Sciences*, 25(12), 1299–1305.
- Vogt, S., Schumacher, Y. O., Roecker, K., Dickhuth, -H.-H., Schoberer, U., Schmid, A., & Heinrich, L. (2007). Power output during the Tour de France. *International Journal of Sports Medicine*, 28(9), 756–761. doi:10.1055/s-2007-964982
- Weston, M., Gregson, W., Castagna, C., Breivik, S., Impellizzeri, F. M., & Lovell, R. J. (2011). Changes in a top-level soccer referee's training, match activities, and physiology over an 8-year period: A case study. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 6(2), 281–286.
- Wooles, A., Robinson, A., & Keen, P. (2005). A static method for obtaining a calibration factor for SRM bicycle power cranks. *Sports Engineering*, 8(3), 137–144. doi:10.1007/bf02844014

CHAPITRE 4 : Détermination d'une méthode d'évaluation de la PMA et de l'endurance aérobie en cyclisme sur le terrain

Les résultats de ce travail ont fait l'objet d'un article publié dans la revue *Journal of Science and Cycling* : « Determination of Maximal Aerobic Power on the field in cycling » (Pinot J et Grappe, 2014)

Résumé détaillé

Determination of Maximal Aerobic Power on the field in cycling

Pinot J et Grappe F

Etat de l'art : La PMA est une variable particulièrement intéressante à prendre en considération dans le processus d'entraînement en cyclisme. Plusieurs études ont montré la corrélation significative qui existe entre la PMA évaluée en laboratoire et la performance en cyclisme en CLM (Hawley et Noakes, 1992 ; Balmer *et al.*, 2000 ; Bentley *et al.*, 2001). Cependant, la PMA étant protocole-dépendante, il n'existe aucun protocole de référence pour la déterminer (Faria *et al.*, 2005). Seules deux études ont rapportés des tests d'évaluation sur le terrain pour l'évaluer, l'une à partir d'un test incrémental sur vélodrome (Gonzalez-Haro *et al.*, 2007) et l'autre à partir d'un test maximal sur le terrain de 4 min (Nimmerichter *et al.*, 2010). Les différents protocoles induisent des variations significatives du temps de maintien (T_{PMA}) (Bosquet *et al.*, 2002). Dans ce contexte, l'utilisation du PPR pourrait être un moyen approprié pour déterminer la PMA puisqu'il apporte plusieurs avantages : mesure de $P_{méca}$ sur le terrain, monitoring de l'entraînement et des compétitions ou encore inclusion de durées d'efforts maximales comprises entre 1 sec et 4h (Pinot J. et Grappe, 2011). En effet, en se basant sur le modèle de Peronnet et Thibault (Peronnet et Thibault, 1984 ; Peronnet *et al.*, 1987 ; Tokmakidis *et al.*, 1987), il est théoriquement possible d'évaluer le potentiel aérobie du cycliste à partir de la régression linéaire entre les $P_{méca}$ records et le logarithme du temps (\log_t). L'une des limites du modèle de Peronnet et Thibault réside dans le fait que T_{MAP} est

considéré constant (7 min) pour tous les athlètes alors qu'en cyclisme, il se situerait entre 3 et 6 min ((Billat *et al.*, 1996 ; Faina *et al.*, 1997 ; Bosquet *et al.*, 2002).

Objectif : L'objectif de cette étude était de proposer une méthodologie d'évaluation de la PMA, de T_{PMA} et d'un indice de la capacité d'endurance aérobie (index d'endurance aérobie) chez des cyclistes à partir du PPR. Nous avons fait l'hypothèse qu'il devait être possible de déterminer pour chaque cycliste la PMA à partir d'un point de déflexion situé entre 3 et 6 min dans la relation $P_{méca\ record} - \log_t$, ce point correspondant à la puissance maximale du métabolisme aérobie.

Méthodes : 28 cyclistes de haut niveau (15 professionnels et 13 élites) ont réalisé l'ensemble des entraînements et des compétitions pendant deux années avec un capteur de puissance SRM. Le PPR de chaque cycliste a été établi à partir des $P_{méca}$ records sur 1, 5 et 30 sec, 1, 3, 3,5, 4, 4,5, 5, 5,5, 6, 6,5, 7, 10, 20, 30, 45 et 60 min, 2, 3 et 4 h. Considérant que T_{MAP} était inférieur à 10 min et sur la base du modèle de Peronnet et Thibault, le métabolisme aérobie de chaque cycliste a été modélisé à partir du PPR avec la relation linéaire qui existe entre les $P_{méca}$ records et le \log_t entre 10 min et 4 h. Les régressions linéaires équivalentes à ± 2 écarts-types résiduels ont été calculées pour délimiter un intervalle de confiance encadrant la régression linéaire $P_{méca\ record} - \log_t$. Cette dernière était extrapolée autour des $P_{méca}$ records comprises entre 3 et 10 min pour déterminer le point d'inflexion correspondant à la puissance maximale du métabolisme aérobie (PMA). La PMA était définie à partir de la première $P_{méca}$ record située à l'intérieur de l'intervalle de confiance et T_{PMA} avec la durée correspondante à cette dernière (figure 28).

Un index de la capacité d'endurance aérobie de l'athlète a été déterminé en exprimant les $P_{méca}$ records en pourcentage de la PMA ($\%_{PMA}$) entre T_{MAP} et 4h en fonction de \log_t . La pente de la relation $\%_{PMA} - \log_t$ correspondait à l'indice d'endurance selon la méthodologie utilisée par Peronnet et Thibaut en course à pied (figure 29).

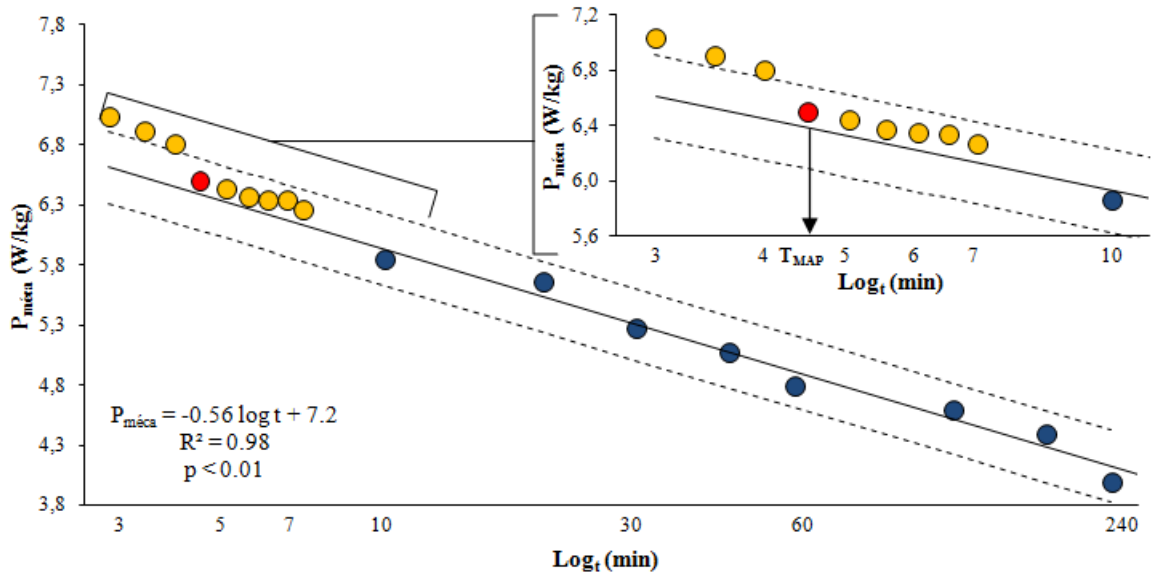


Figure 28 Méthodologie de détermination de PMA et T_{PMA} . La ligne continue représente la régression linéaire de la relation $P_{méca}$ record – \log_t entre 10 min et 4 h (bleu). Les lignes pointillées représentent les extrémités de l'intervalle de confiance équivalentes à 2 écarts-types résiduels à la régression. L'intervalle de confiance est extrapolé autour des $P_{méca}$ records entre 3 et 7 min (jaune). PMA est la première $P_{méca}$ record à l'intérieur de l'intervalle de confiance (rouge). Pour ce cycliste : PMA = 6.5 W/kg et T_{PMA} = 4,5 min.

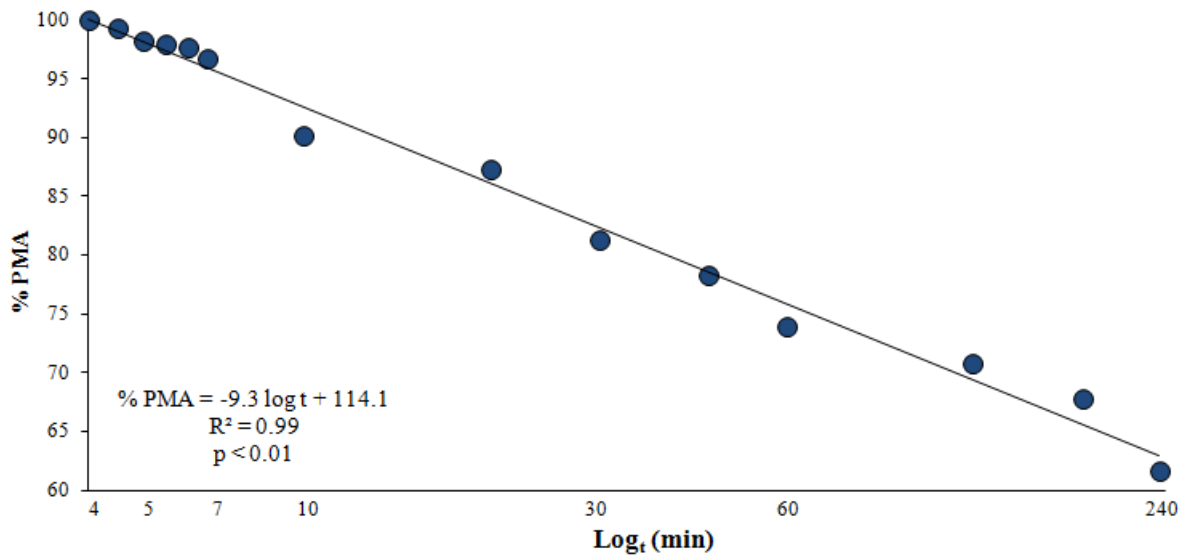


Figure 29 Relation % PMA – \log_t du même cycliste que dans la figure 28. La pente de cette relation détermine l'indice d'endurance aérobie (-9,3 pour ce cycliste)

Résultats : A partir de cette méthodologie, les valeurs de PMA et T_{PMA} moyens sur l'ensemble du groupe étaient respectivement de 456 ± 42 W ($6,87 \pm 0,5$ W) et de $4,13 \pm 0,7$ min. Les cyclistes professionnels avaient une PMA significativement supérieure à celle des élites : 476 W vs. 433 W. Par contre, T_{PMA} était significativement supérieur chez les cyclistes élites : 4,46 min vs. 3,86 min. L'indice d'endurance aérobie moyen des cyclistes était de -9,53, et il était compris entre -8,34 et -11,33. Il n'existait pas de différence significative entre l'indice d'endurance aérobie des professionnels et celui des élites.

Discussion : Cette méthodologie de détermination de la PMA et de T_{PMA} possèdent plusieurs avantages par rapport aux protocoles classiques généralement réalisés en laboratoire : 1) spécificité de la mesure de $P_{méca}$ en conditions réelles sur le terrain, 2) motivation de l'athlète supérieure, 3) prise en considération d'efforts maximaux entre 1 sec et 4h, 4) individualisation du temps de maintien à PMA et 5) affranchissement de l'utilisation d'un ergomètre.

La valeur moyenne de T_{PMA} obtenue chez le groupe de cyclistes (4,13 min) est en accord avec les études précédentes qui ont évalué le temps de maintien à $\dot{V}O_{2max}$ (Billat *et al.*, 1996 ; Faina *et al.*, 1997). De plus, Nimmerichter *et al.* (2010) avait montré que la $P_{méca}$ mesurée lors d'un test maximal de 4 min sur le terrain était un bon prédicateur de la PMA. Le fait que les cyclistes professionnels possèdent une PMA supérieure mais un T_{PMA} inférieur aux cyclistes élites est en lien avec les études de Billat *et al.* qui ont observé que les athlètes avec les $\dot{V}O_{2max}$ les plus élevées étaient ceux qui avaient un temps de maintien le plus court (Billat *et al.*, 1994 ; Billat et Koralsztein, 1996).

Cette étude est également la première à évaluer un indice de la capacité d'endurance aérobie en cyclisme à partir de la mesure de la $P_{méca}$ sur la base de la méthodologie utilisée par Peronnet et Thibaut (Peronnet et Thibault, 1984 ; Peronnet *et al.*, 1987 ; Tokmakidis *et al.*, 1987). L'indice d'endurance aérobie reflète la capacité à limiter la perte de $P_{méca}$ avec l'augmentation de la durée de l'effort. Plus l'indice est élevé, meilleure est la capacité d'endurance aérobie de l'athlète. L'utilisation du PPR apporte davantage de fiabilité dans la méthodologie étant donné que Peronnet et Thibault déterminaient leur indice sur la base d'estimations indirectes de la $\dot{V}O_2$ à partir de performances réalisées en course à pied et en fixant la durée de maintien de la $\dot{V}O_{2max}$ à 7 min pour tous les athlètes. Les résultats suggèrent que cette méthode d'évaluation de l'endurance aérobie est valide étant donné qu'elle est fidèle à sa définition c'est-à-dire à la capacité de maintenir des $\%PMA$ élevés sur de longues périodes de temps.

De nombreuses applications pratiques pour le processus d'entraînement peuvent être tirées de cette étude. En effet, la détermination d'une PMA de terrain permet d'affiner la programmation des entraînements et notamment d'améliorer le calibrage des zones d'intensité durant l'effort. La relation $\%_{MAP} - \log_t$ autorise l'entraîneur à évaluer la capacité d'endurance aérobie du cycliste et à suivre son évolution dans le temps.

Conclusion : Le résultat principal de cette étude montre qu'il est possible de déterminer PMA, T_{PMA} et un indice d'endurance aérobie avec des mesures de $P_{méca}$ réalisées sur le terrain à partir du PPR. Il peut en découler de nombreuses applications pratiques utiles dans le suivi du processus d'entraînement en cyclisme.

Determination of Maximal Aerobic Power on the field in cycling

Julien Pinot^{1,2}✉ and Frederic Grappe^{1,2}

Abstract

In cycling, the maximal aerobic power (MAP) is an important parameter for the coaches in the training process and the monitoring of the cyclist's aerobic potential. However, there is no common procedure that would determine the MAP since it is dependent on the test protocol in laboratory and field. The purpose of this study was to propose a methodology from field data to determine both a field MAP, the time that MAP can be sustained (T_{MAP}) and an aerobic endurance index (AEI) in professional and elite cyclists. Twenty-eight cyclists trained and raced with mobile power meter devices fixed to their bikes during two consecutive seasons. The Record Power Profile (RPP) of each cyclist was determined from the maximal power output realised by the cyclists (i.e. record PO) on different durations between 1 second and 4 hours. The method of MAP determination was to define the upper limit of the aerobic metabolism from the relationship between the record PO (from 3 min to 4 h) and the logarithm of time. From this method, the average values of MAP and T_{MAP} were 456 ± 42 W (6.87 ± 0.5 W.kg⁻¹) (95%CI = 439 - 473 W) and 4.13 ± 0.7 min (95%CI = 3.84 - 4.42 min), respectively. All the AEI were ranged between -8.34 and -11.33 (mean AEI = -9.53 ± 0.7 , 95%CI = -9.24 / -9.82). The most important finding of this study is the possible determination of MAP, T_{MAP} and AEI on the field from the RPP. Compared to the elite cyclists, the professionals presented a higher MAP (+9.9%, $p < 0.05$) and shorter T_{MAP} (-13.5%, $p < 0.05$) with no difference in AEI. Several practical applications of this field method may be relevant and suitable for the coaches in the training monitoring of their cyclists.

Keywords: maximal aerobic power, aerobic endurance index, cycling, power output, record power profile, SRM powermeter.

✉ Contact email: julienpinot@laposte.net (J. Pinot)

¹ University of Franche Comte, EA4660, Health and Sport Department, C3S, France

² FDJ.fr Pro Cycling Team, France

Received: 12 September 2012. Accepted: 27 May 2014.

Introduction

In cycling, the maximal aerobic power (MAP) is a fundamental parameter in the training process. MAP is used by the coaches and scientists to assess the aerobic potential of the athletes, to determine the exercise intensities and is useful to monitor the adaptation to training. Several studies have shown the correlation between the MAP obtained during laboratory tests and cycling performance, as time trial (Balmer et al. 2000; Bentley et al. 2001; Hawley and Noakes 1992). However, there is no common procedure that would determine the MAP (Faria et al. 2005a). In the laboratory, MAP values determined from incremental tests are dependent on the protocol according to stage duration, work-load increase and type of ergometer (Faria et al. 2005a; Hopkins et al. 2001). Few studies have reported tests in real cycling conditions. Only Gonzales-Haro et al. and Nimmerichter et al. have proposed to assess MAP from field tests with an incremental protocol on velodrome and a 4 min time-trial, respectively (Gonzalez-Haro et al. 2007; Nimmerichter et al. 2010). In these laboratory and field

tests, the values of MAP are protocol-dependent and are defined as the power output at the maximal oxygen consumption ($\dot{V}O_{2max}$) rate. Thus, according to a protocol, a $\dot{V}O_{2max}$ value can be associated with different values of MAP. It automatically involves significant changes in the duration during which MAP can be sustained (T_{MAP}). Therefore, it would be interesting to define a procedure which assesses MAP in real cycling conditions avoiding the bias dependent of the proposed protocol.

In this context, the Record Power Profile (RPP) of the cyclist could be a suitable tool to determine MAP since it provides many advantages from the measurement of field PO, the monitoring of training and competition data and the inclusion of exercise durations from 1 s to 4h (Pinot and Grappe 2011b). The decrease of record PO over time shows a hyperbolic relation that can be explained by the combined actions of the various bioenergetic processes (Morton and Hodgson 1996). By using the method of Peronnet and Thibault (Peronnet and Thibault 1987, 1989; Peronnet et al. 1987; Tokmakidis et al. 1987), a preliminary study showed that the determination of an Aerobic Endurance Index (AEI) was possible from the RPP by analysing the linear decrease of the record PO between 5 min and 4 h when the duration is expressed as a function of the logarithm of time (PO-Log_t) (Pinot and Grappe 2011a). This model showed that the record PO corresponding to the duration of 5 min is certainly closer to the value of MAP. However, according to previous studies (Billat et



al. 1996; Bosquet et al. 2002; Faina et al. 1997), the upper limit of the aerobic metabolism could be situated between 3 and 6 min.

The purpose of this study was to propose a methodology taking into account PO in real cycling conditions to determine MAP, T_{MAP} and an AEI in professional and elite cyclists. We hypothesised that it should be possible to determine MAP from a deflection point located between 3 and 6 min on the $PO-Log_t$ relationship at which the aerobic metabolism is maximal (Billat et al. 1996; Bosquet et al. 2002; Faina et al. 1997; Laursen et al. 2007).

Materials and methods

Subjects

This study was carried out in professional and elite cycling teams. A local ethic committee (FDJ Health and Medical Department) approved this experimental procedure according to international standards (Harris and Atkinson 2011). All the participants were volunteers. They were informed about the experimental procedure and the purpose of the present study, each gave his written informed consent. For the experimental procedure they carried out their usual activities (Winter and Maughan 2009). The data of 28 cyclists were studied. Their mean (+SD) age, height and body mass were 25 ± 4 years, 179 ± 6 cm and 67 ± 6 kg, respectively. Fifteen cyclists were members of professional cycling teams and covered between 25000 and 35000 km per year. They had between 65 and 90 days of competition per season (ranging from 1-day races to stage races of 3 weeks). The others (n = 13) were elite cyclists and ranked in the 1st category in France, with 7 of whom had raced with the U23 French Team. They covered distances ranging from 18000 to 23000 km per year. They had between 50 and 70 days of competition per season (ranging from 1-day races to stage races of 1 week). Study subjects had high performance levels and included 18 cyclists who

have raced World or European championship with their National Team, sprinters and climbers at the World-Tour level. Their average weekly training time was 18 ± 3 h.

SRM Measurements

The cyclists performed all their training and competitions over two consecutive seasons (22 months) with mobile power meters mounted on their bikes (SRM Professional Training System, Schoberer Rad Messtechnik, Jülich, Germany). They were accustomed to using SRM Powermeters. According to the manufacturers' recommendations, the slope of calibration for each SRM was verified every 3 months using a static calibration to determine the relationship between the torque (Nm) and frequency (Hz) (Woolles et al. 2005). The cyclists were informed of the importance of performing the zero offset frequency procedure before each training session and race in order to obtain accurate PO data (Abbiss et al. 2009; Gardner et al. 2004). Thus, the values of slope and zero offset

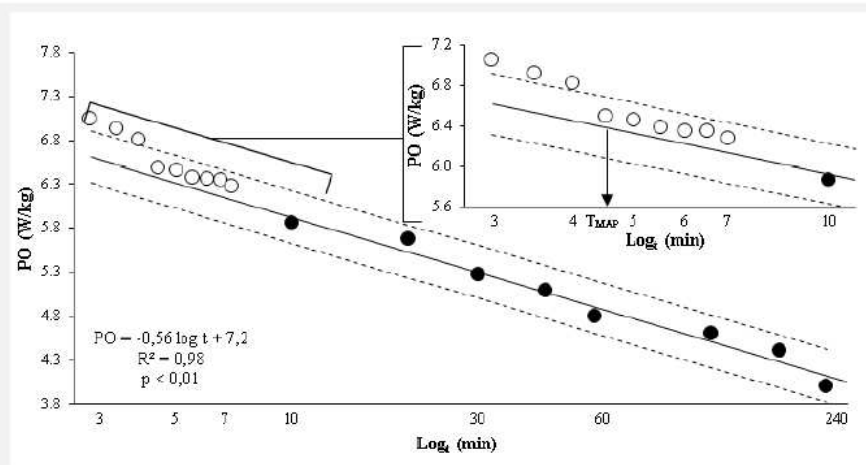


Figure 1. Methodology of determining MAP and T_{MAP} . Solid line represents the linear regression of the relationship between the record PO from 10 min to 4 h (black points) and Log_t . Dotted lines are residual 2-standard deviations of the regression. White points are record PO from 3 to 7 min, where the confidence interval is extrapolated. MAP is the first record PO inside the confidence interval (range between dotted lines). For this cyclist: MAP = 6.5 W.kg⁻¹ and T_{MAP} = 4.5 min.

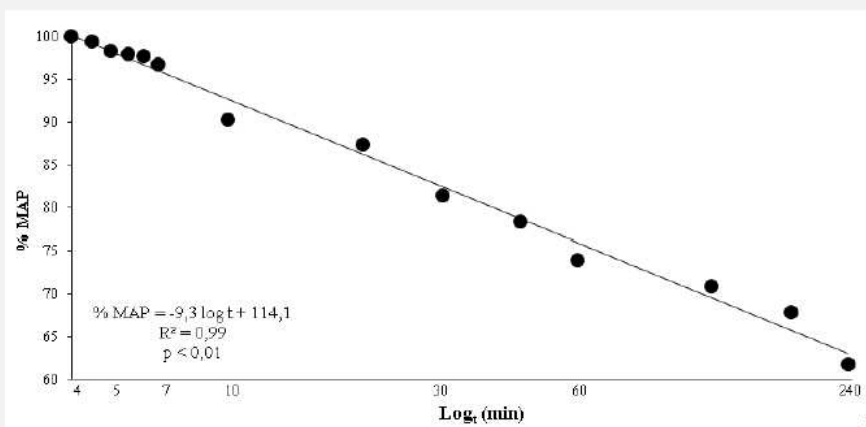


Figure 2. % MAP- Log_t relationship of the same cyclist as in Figure 1. The slope of the relationship determines the AEI (-9.3 for this cyclist)

has been verified before each analysis.

SRM Data analysis

After each training and competition, the cyclists transferred their data from the power control to their computer using the SRM Software (v6.41.04 Schoberer Rad Messtechnik, Germany). After their files were received by e-mail, the data were analysed with the use of TrainingPeaks software (WKO+, v3.0, Peakware, CO, U.S.A.). All data were analysed in order to obtain the Maximal Mean Power (MMP) for times of 1, 5 and 30 sec, and 1, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 6.5, 7, 10, 20, 30, 45, 60, 120, 180, and 240 min. Maximal values for each duration were retained to determine the various record PO.

Determination of MAP

As it is well established that T_{MAP} is lower than 10 min (Billat et al. 1996; Bosquet et al. 2002; Faina et al. 1997; Hopkins et al. 2001), according to the model of Peronnet and Thibault (Peronnet and Thibault 1987; Peronnet et al. 1987), the aerobic metabolism was modeled from RPP by a linear $PO\text{-}Log_t$ relationship from 10 min to 4 h. The regression equation was in the form: $PO = a \ln t + b$. Residual 2-standard deviations (r_{2SD}) equations of the linear regression were calculated by the equations $PO = a \ln t + b \pm r_{2SD}$. A confidence interval was plotted by extrapolating the range between the r_{2SD} lines until 3 min from the experimental data (10 min to 4 h). This confidence interval provides a

Table 1. Average record POs for various time durations (min) for 26 cyclists. Values are Mean \pm SD, and Range [minimum – maximum].

| Duration | Absolute PO (W) | Absolute PO Range (W) | Normalised PO ($W.kg^{-1}$) | Normalised PO Range ($W.kg^{-1}$) |
|----------|-----------------|-----------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| 0.016 | 1339 \pm 164 | [1018 – 1691] | 20.1 \pm 1.6 | [17.6 – 23.6] |
| 0.083 | 1268 \pm 144 | [984– 1580] | 19.1 \pm 1.4 | [16.9–21.6] |
| 0.5 | 865 \pm 93 | [709 - 1056] | 13.0 \pm 1.1 | [11.3 – 15.3] |
| 1 | 648 \pm 66 | [532 - 777] | 9.8 \pm 0.7 | [8.7 – 11.3] |
| 3 | 484 \pm 38 | [412– 570] | 7.3 \pm 0.5 | [6.5 – 8.5] |
| 3.5 | 470 \pm 37 | [401– 547] | 7.1 \pm 0.5 | [6.2 – 8.2] |
| 4 | 460 \pm 37 | [385– 524] | 6.9 \pm 0.5 | [6.2 – 7.8] |
| 4.5 | 451 \pm 37 | [372– 527] | 6.8 \pm 0.4 | [6.0 – 7.9] |
| 5 | 443 \pm 37 | [368– 504] | 6.7 \pm 0.4 | [5.9 – 7.5] |
| 5.5 | 438 \pm 37 | [364– 505] | 6.6 \pm 0.4 | [5.9 – 7.5] |
| 6 | 431 \pm 37 | [362– 489] | 6.5 \pm 0.4 | [5.7 – 7.4] |
| 6.5 | 427 \pm 37 | [357 – 484] | 6.5 \pm 0.4 | [5.7 – 7.3] |
| 7 | 423 \pm 36 | [358– 478] | 6.4 \pm 0.4 | [5.7 – 7.3] |
| 10 | 408 \pm 36 | [333 – 462] | 6.2 \pm 0.4 | [5.5 – 7.0] |
| 20 | 382 \pm 32 | [312 – 441] | 5.8 \pm 0.4 | [5.2 – 6.6] |
| 30 | 360 \pm 31 | [293– 410] | 5.4 \pm 0.4 | [4.9 – 6.2] |
| 45 | 343 \pm 30 | [289– 393] | 5.2 \pm 0.4 | [4.4 – 5.9] |
| 60 | 329 \pm 28 | [275– 379] | 5.0 \pm 0.3 | [4.3 – 5.7] |
| 120 | 303 \pm 28 | [253– 365] | 4.6 \pm 0.3 | [4.0 – 5.2] |
| 180 | 288 \pm 23 | [235– 338] | 4.4 \pm 0.2 | [4.0 – 4.8] |
| 240 | 272 \pm 24 | [221– 313] | 4.1 \pm 0.3 | [3.4 – 4.7] |

Table 2. MAP and T_{MAP} (Values are Mean \pm SD, Coefficient of Variation across the group (%) [Minimum; Maximum])

| | MAP (W) | MAP ($W.kg^{-1}$) | T_{MAP} (min) |
|-----------------------|----------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| All cyclists | 456 \pm 42 (9%) [373 / 526] | 6.87 \pm 0.5 (7%) [6.2 / 8.0] | 4.13 \pm 0.7 (17%) [3.0 / 5.5] |
| Elite cyclists | 433 \pm 36 [373 / 495] | 6.70 \pm 0.3 [6.2 / 7.3] | 4.46 \pm 0.8 [3.0 / 5.5] |
| Professional cyclists | 476 \pm 38** [387 / 526] | 7.02 \pm 0.6* [6.2 / 8.0] | 3.86 \pm 0.5** [3.0 / 4.5] |

*: significant difference with elite cyclists ($p < 0.1$)
 **: significant difference with elite cyclists ($p < 0.05$)

Table 3. Aerobic Endurance Index (AEI) (values are Mean \pm SD, coefficient of variation across the group (%)) and Range: Minimum/Maximum.

| | Aerobic Endurance Index | Range |
|-----------------------|-------------------------|----------------|
| All cyclists | -9.53 \pm 0.7 (8%) | -11.33 / -8.34 |
| Elite cyclists | -9.33 \pm 0.5 (5%) | -10.23 / -8.34 |
| Professional cyclists | -9.71 \pm 0.8 (8%) | -11.33 / -8.44 |

confidence interval provides a

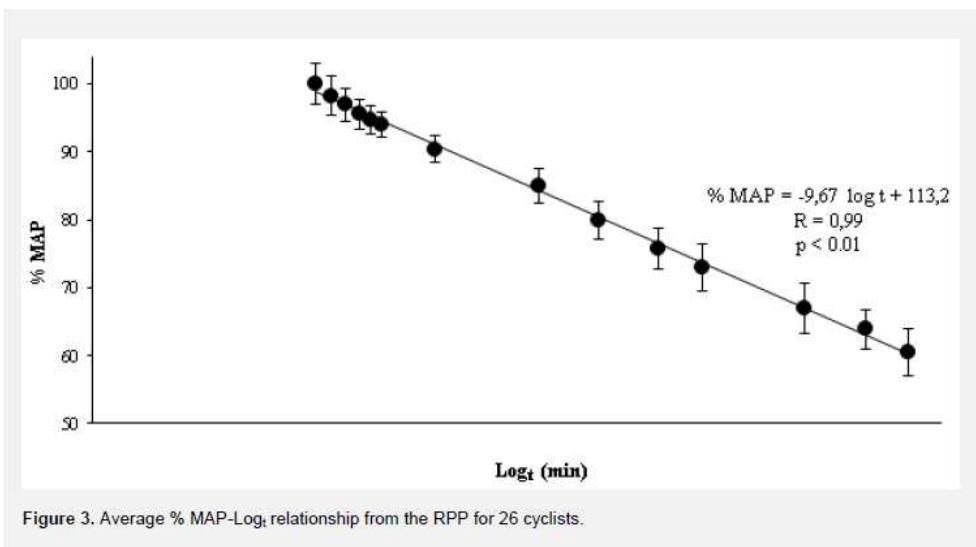


Figure 3. Average % MAP- Log_t relationship from the RPP for 26 cyclists.

window from which it is possible to determine the point at which the record PO (calculated each 30 s between 3 and 7 min) drifts upward and leaves the r_{2SD} area to show the predominance of the anaerobic metabolism. Thus, MAP has been defined as the first record PO included in the confidence interval and T_{MAP} as the sustained time equivalent at MAP. The methodology is depicted in Figure 1 with an example of rider's data.

Determination of Aerobic Endurance Index

After the determination of MAP for each subject, all the record PO were expressed in terms of percentage of MAP (% MAP) between T_{MAP} and 4 h according to the Log_t . The slope of this relationship (% MAP- Log_t) represents an index of the aerobic endurance capability (AEI) of the cyclist, as described for runners by Peronnet and Thibault (Peronnet et al. 1987). Figure 2 presents an example for a cyclist of the % MAP- Log_t relationship from T_{MAP} to 4 h.

Statistical analysis

Descriptive statistics were used, and all data were expressed as mean \pm standard deviation (SD). For each parameter, the 95% confidence interval (95%CI) was calculated. To describe the relationship between selected variables, Pearson zero-order correlation coefficients were computed by the least-squares method.

The normality of value distribution within categories was assessed with the Shapiro-Wilk test. Student t-tests were used to compare values between the two groups for MAP, T_{MAP} and AEI within categories.

Results

The RPP of 26 cyclists were used for the statistical analysis. The RPP of two riders were not retained because of invalid data. Table 1 presents the decrease of the average record PO for the 26 cyclists between 1339 ± 164 W (20.1 ± 1.6 W.kg⁻¹) for 1 sec and 272 ± 24 W (4.1 ± 0.3 W.kg⁻¹) for 4 h.

Table 2 presents the average MAP and T_{MAP} for the 26 cyclists. The average values of MAP and T_{MAP} are 456 ± 42 W (6.87 ± 0.5 W.kg⁻¹) (CV = 9%, 95%CI = 439 - 473 W) and 4.13 ± 0.7 min (CV = 17%, 95%CI = 3.84 - 4.42 min), respectively. The student t-tests indicate significant differences ($p < 0.05$) between the two categories of cyclists for both MAP (in W) and T_{MAP} . Professional cyclists have a shorter T_{MAP} (-13.5%) than elite cyclists (3.86 min vs. 4.46 min). MAP of professional cyclists is higher than that of elite cyclists: 476 W vs. 433 W (+9.9%, $p < 0.05$) and 7.02 W.kg⁻¹ vs. 6.70 W.kg⁻¹ (+4.8%, $p < 0.1$).

The figure 3 presents the average % MAP- Log_t relationship for the 26 cyclists. The % MAPs are linearly correlated with the Log_t between T_{MAP} and 240 minutes ($R = 0.99$, $p < 0.01$). The correlation is characterised by the equation: % MAP = $-9.67 \log t + 113.2$. The mean AEI derived from the slope of the regression is equal to -9.67.

The table 3 presents the different AEI for the 26 cyclists. The AEI are ranged between -8.34 and -11.33

(mean AEI = -9.53 ± 0.7 , 95%CI = $-9.24 / -9.82$). The student t-tests indicate no significant difference in AEI between the two competition levels.

Discussion

The most important finding of this study is the possible determination of MAP, T_{MAP} and AEI on the field from the RPP. Compared to the elite cyclists, the professionals presented a higher MAP (+9.9%) and shorter T_{MAP} (-13.5%) with no difference in AEI. The T_{MAP} were ranged between 3 and 6 min as it was expected according to the previous studies (Billat et al. 1996; Bosquet et al. 2002; Faina et al. 1997; Hopkins et al. 2001). Our results indicate that it appears possible to determine MAP on the field from the RPP avoiding the bias dependent of an evaluation protocol.

The use of laboratory or field test to determine MAP has been much debated (Berthon et al. 1997; Billat et al. 1996; Bosquet et al. 2002; Faina et al. 1997; Faria et al. 2005b; Hopkins et al. 2001; Laursen et al. 2007; Lucia A and J Hoyos 2004). On the field, the coaches must take into account a valid PO to establish training programmes and track the evolution of the cyclist's potential. Thus, the use of RPP appears suitable since it is obtained from a monitoring of training and competition record PO. This procedure allows to avoiding some limitations of laboratory tests to assess MAP: protocol-dependence, motivation of the athlete, ergometer... Conversely, it possesses interesting advantages, which do not exist in other tests, like specificity with real cycling conditions, accommodations of exercise durations from 1 s to 4 h and consideration of an individual time sustained at MAP. The inclusion of competition performances in the process of MAP determination seems to be essential since, as suggested by Bosquet (Bosquet et al. 2002), data gained during competitive events of differing durations represent a reliable mean of assessing aerobic endurance. Indeed, Sassi et al. (Sassi et al. 2006) explained that it was very difficult to require repeated exhaustive efforts during periods of training because highly demanding maximal tests are often unacceptable to high-level athletes, especially those close to important competitions.

The mean MAP of cyclists was equal to 456 W (6.87 W.kg⁻¹) (95%CI = 439 - 473 W) and the corresponding mean T_{MAP} was 4.13 min (4 min and 7 s) (95%CI = 3.84 - 4.42 min) with a wide inter-individual variability (CV = 17%). The results are in accordance with previous studies which have shown similarities with $\dot{V}O_{2max}$ found by Billat et al. (3.70 ± 1.52 min) and Faina et al. (3.75 ± 1.57 min) with cyclists (Billat et al. 1996; Faina et al. 1997). Additionally, Nimmerichter et al. observed that the PO developed during a 4 min time trial on the field was a good predictor of the MAP measured on an incremental exercise test (Nimmerichter et al. 2010). In the same way, Allen and Coogan used a 5 min all-out test to evaluate PO corresponding at the maximal oxygen uptake (Allen and Coogan 2010). As the results show that T_{MAP} is closer to 4 min, future studies should determine 1) the

interest of the 4 min field test in assessment of MAP according to RPP and 2) if there are differences in PO between laboratory, flat and uphill time trials (Nimmerichter et al. 2010).

Significant differences in MAP and T_{MAP} were found between elite and professional cyclists. Professional cyclists had higher MAP ($p < 0.05$) ($476 \text{ W} / 7.02 \text{ W.kg}^{-1}$ vs $433 \text{ W} / 6.70 \text{ W.kg}^{-1}$) than elite cyclists but shorter T_{MAP} ($p < 0.05$) (3.86 min vs. 4.46 min). This result is in accordance with those of Billat et al. (Billat and Koralsztein 1996; Billat et al. 1994) showing that athletes with the highest maximal aerobic PO are those with the shortest time to exhaustion. Nevertheless, no significant correlation was found between MAP and T_{MAP} .

The AEI was determined in this study from the relationship between record PO, expressed according to % MAP and log time (between T_{MAP} and 4 h), by using the RPP of 26 cyclists according to the method of Pinot and Grappe (Pinot and Grappe 2011a). The regression can be expressed by the equation: % MAP = $-9.67 \log t + 113.2$ ($r = 0.99$, $p < 0.001$), which can be considered as an expression of the mean aerobic potential of high-level cyclists.

To the best of our knowledge, no study has been conducted to assess the aerobic endurance capability from AEI in cycling with field measurements of PO according to the model of Peronnet and Thibault (Peronnet and Thibault 1987; Peronnet et al. 1987). Previous studies have determined AEI from $\dot{V}O_2$ estimated from running performances (Bosquet et al. 2002; Lacour and Flandrois 1977; Peronnet and Thibault 1987, 1989; Peronnet et al. 1987). The AEI obtained in this study from PO measurements (mean : -9.53, ranged between -8.34 and -11.3) were lower than the mean AEI (-6.40) and limit values (-4.07 and -9.96, CV=23%) determined previously from indirect % $\dot{V}O_{2max}$ in a population of 18 marathon runners (Peronnet et al. 1987). AEI reflects the capacity to limit loss of PO with increased duration of exercise. The higher the AEI is, the better the aerobic endurance capability is (Peronnet and Thibault 1987; Peronnet et al. 1987). The use of RPP improves assessment of AEI because it is computed from several record PO, contrary to the method of Peronnet and Thibault which uses only two performances. In addition, the determination of AEI in this study was based on direct field measurements of PO, whereas the runners' AEI was determined with a somewhat imprecise indirect method from estimates of $\dot{V}O_2$ using running speeds. The differences in AEI between cycling and running may be due to changes of both muscle contractions (concentric vs. plyometric in running) and measuring methods. These findings suggest that the method for assessing aerobic endurance capability from AEI in elite cyclists appears valid, since it remains true to its definition (i.e., the ability to sustain a high % MAP (or $\dot{V}O_{2max}$) for a long period of time) (Bosquet et al. 2002; Lacour and Flandrois 1977; Peronnet et al. 1987; Tokmakidis et al. 1987).

No significant difference in AEI was observed between elite (-9.33) and professional cyclists (-9.71). The similarity of AEI between these two categories of cyclists could be explained by the fact that the majority of elite cyclists belonged to the U23 national team and had the potential to become professionals. Thus, their endurance training was close enough to the professional cyclists. The population studied included only high-level cyclists. Therefore, it would be interesting in a future study to assess this capability in novice cyclists, amateurs, track riders and mountain bikers in order to track aerobic endurance of different competition levels.

Practical applications

In cycling, MAP is a central parameter in the training process and in the monitoring of the physical potential. As there is no existing a reference protocol to assess MAP, the proposed field method in this study offers many advantages previously mentioned. Since the PO developed by a cyclist is measured directly on the bicycle during training and competition, it has become widely admitted that the field data collecting is of great value. Thus, the values of MAP obtained from a valid RPP could allow the coach to optimize the prescription of the exercise training loads in power-based training.

The assessment of endurance aerobic capability with AEI also appears to be a relevant process to evaluate the aerobic potential of cyclists. As mentioned by Bosquet (Bosquet et al. 2002), the major advantage of AEI is its accessibility, since this index can be estimated easily from field performance data ranging between 4 min to 4 h. It remains a convenient tool for modelling aerobic endurance.

The % MAP- $\log t$ relationship allows a coach to track the cyclist fitness with a different point of view 1) to compare aerobic endurance capability of cyclists with different levels of MAP (Figure 4) and 2) to draw the virtual % MAP- $\log t$ relationship for a cyclist who never reached his maximum physical potential over various durations (Figure 5). Thus, it becomes possible to estimate the PO potentially achievable by a cyclist from the % MAP- $\log t$ relationship and, therefore, a more accurate AEI.

More generally, the exercise intensity zones are determined for the power-based training process after the assessment of MAP with a traditional incremental peak-power output test in laboratory or a field test (Gonzalez-Haro et al. 2007; Nimmerichter et al. 2010). The % MAP- $\log t$ relationship provide an additional method to determine the different exercise intensity zones. As the durations required to draw this relationship are ranged from 1 s to 240 min, aerobic and anaerobic areas (Pinot and Grappe 2011b) can be determined from the % MAP according to the results of this study: Zone 1 (low exercise intensity, below 60% MAP), Zone 2 (moderate exercise intensity, from 60 to 75% MAP), Zone 3 (heavy exercise intensity, from 75 to 85% MAP), Zone 4 (severe exercise intensity - low end,

from 85 to 100% MAP), Zone 5 (severe exercise intensity – high end, from 100 to 190% MAP) and Zone 6 (force-velocity: from 190% to 320% MAP).

Acknowledgment

The authors would like to thank Pierre Samozino for his valuable advice and the athletes for their time and enthusiasm. This study was supported by the FDJ.fr Pro Cycling Team.

Conflict of interest statement

No funding was received for this work (from the National Institutes of Health, the Wellcome Trust, The Howard Hughes Medical Institute, or any others). The authors declare that there are no conflicts of interest. The results of this study do not benefit to any companies or manufacturers.

References

1. Abbiss CR, Quod MJ, Levin G, Martin DT, Laursen PB (2009) Accuracy of the Velotron ergometer and SRM power meter. *Int J Sports Med* 30: 107-112
2. Allen H, Coggan AR (2010) Training and Racing with a Power Meter. VeloPress, Boulder, Colorado
3. Balmer J, Davison RC, Bird SR (2000) Peak power predicts performance power during an outdoor 16.1-km cycling time trial. *Med Sci Sports Exerc* 32: 1485-1490
4. Bentley DJ, McNaughton LR, Thompson D, Vleck VE, Batterham AM (2001) Peak power output, the lactate threshold, and time trial performance in cyclists. *Med Sci Sports Exerc* 33: 2077-2081
5. Berthon P, Fellmann N, Bedu M, Beaune B, Dabonneville M, Coudert J, Chamoux A (1997) A 5-min running field test as a measurement of maximal aerobic velocity. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 75: 233-238
6. Billat LV, Koralsztein JP (1996) Significance of the velocity at VO₂max and time to exhaustion at this velocity. *Sports Med* 22: 90-108
7. Billat V, Faina M, Sardella F, Marini C, Fanton F, Lupo S, Faccini P, de Angelis M, Koralsztein JP, Dalmonte A (1996) A comparison of time to exhaustion at VO₂ max in elite cyclists, kayak paddlers, swimmers and runners. *Ergonomics* 39: 267-277
8. Billat V, Renoux JC, Pinoteau J, Petit B, Koralsztein JP (1994) Times to exhaustion at 100% of velocity at VO₂max and modelling of the time-limit/velocity relationship in elite long-distance runners. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 69: 271-273
9. Bosquet L, Leger L, Legros P (2002) Methods to determine aerobic endurance. *Sports Med* 32: 675-700
10. Faina M, Billat V, Squadrone R, De Angelis M, Koralsztein JP, Dal Monte A (1997) Anaerobic contribution to the time to exhaustion at the minimal exercise intensity at which maximal oxygen uptake occurs in elite cyclists, kayakers and swimmers. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 76: 13-20
11. Faria EW, Parker DL, Faria IE (2005a) The science of cycling: factors affecting performance - part 2. *Sports Med* 35: 313-337
12. Faria EW, Parker DL, Faria IE (2005b) The science of cycling: physiology and training - part 1. *Sports Med* 35: 285-312
13. Gardner AS, Stephens S, Martin DT, Lawton E, Lee H, Jenkins D (2004) Accuracy of SRM and power tap power monitoring systems for bicycling. *Med Sci Sports Exerc* 36: 1252-1258
14. Gonzalez-Haro C, Galilea PA, Drobic F, Escanero JF (2007) Validation of a field test to determine the maximal aerobic power in triathletes and endurance cyclists. *Br J Sports Med* 41: 174-179
15. Harriss DJ, Atkinson G (2011) Update - ethical standards in sport and exercise science research. *Int J Sports Med* 32: 819-821
16. Hawley JA, Noakes TD (1992) Peak power output predicts maximal oxygen uptake and performance time in trained cyclists. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 65: 79-83
17. Hopkins WG, Schabert EJ, Hawley JA (2001) Reliability of power in physical performance tests. *Sports Med* 31: 211-234
18. Lacour JR, Flandrois R (1977) [Role of aerobic metabolism in prolonged intensive exercise]. *J Physiol (Paris)* 73: 89-130
19. Laursen PB, Francis GT, Abbiss CR, Newton MJ, Nosaka K (2007) Reliability of time-to-exhaustion versus time-trial running tests in runners. *Med Sci Sports Exerc* 39: 1374-1379
20. Lucia A, J Hoyos MP, A Santalla, C P Earnest and J L Chicharro (2004) Which laboratory variable is related with time trial performance time in the Tour de France? *Br J Sports Med* 38: 636-640
21. Morton RH, Hodgson DJ (1996) The relationship between power output and endurance: a brief review. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 73: 491-502
22. Nimmerichter A, Williams C, Bachl N, Eston R (2010) Evaluation of a field test to assess performance in elite cyclists. *Int J Sports Med* 31: 160-166
23. Peronnet F, Thibault G (1987) Physiological analysis of running performance: revision of the hyperbolic model. *J Physiol* 82: 52-60
24. Peronnet F, Thibault G (1989) Mathematical analysis of running performance and world running records. *J Appl Physiol* 67: 453-465
25. Peronnet F, Thibault G, Rhodes EC, McKenzie DC (1987) Correlation between ventilatory threshold and endurance capability in marathon runners. *Med Sci Sports Exerc* 19: 610-615
26. Pinot J, Grappe F (2011a) The Peronnet-Thibault mathematical model applied to the record power profile in cycling. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering* 14: 219-220
27. Pinot J, Grappe F (2011b) The record power profile to assess performance in elite cyclists. *Int J Sports Med* 32: 839-844
28. Sassi A, Marcora SM, Rampinini E, Mognoni P, Impellizzeri FM (2006) Prediction of time to exhaustion from blood lactate response during submaximal exercise in competitive cyclists. *Eur J Appl Physiol* 97: 174-180
29. Tokmakidis SP, Leger L, Mercier D, Peronnet F, Thibault G (1987) New approaches to predict VO₂max and endurance from running performances. *J SPORTS MED PHYS FITNESS* 27: 401-409
30. Winter EM, Maughan RJ (2009) Requirements for ethics approvals. *Journal of Sports Sciences* 27: 985-985
31. Wooles A, Robinson A, Keen P (2005) A static method for obtaining a calibration factor for SRM bicycle power cranks. *Sports Engineering* 8: 137-144

CHAPITRE 5 : Influence des conditions et de la nature du terrain sur la $P_{méca}$ produite lors d'un test maximal sur 4 minutes

Les résultats de ce travail ont fait l'objet d'un article soumis dans la revue *International Journal of Sport Medicine* : « Dependency of pedalling condition in 4-min time trial test on maximal aerobic power ». Il est en cours de révision avec une acceptation sous réserve de modifications.

Résumé détaillé

Dependency of pedalling condition in 4-min time trial test on maximal aerobic power

Bouillod A, Pinot J, Soenen F, Ouvrard Y et Grappe F

Etat de l'art : Nimmerichter et *al.* (2010) ont montré que la $P_{méca}$ mesurée lors d'un test maximal de 4 min sur le terrain était un protocole valide d'évaluation de la PMA. L'étude récente de Pinot et Grappe (2014) va dans le même sens puisqu'elle a montré que le T_{PMA} moyen d'un groupe de 28 cyclistes de haut niveau était de 4,13 min. Cependant, plusieurs études tendent à rapporter que la nature du terrain pourrait influencer le niveau de $P_{méca}$ lors d'un test maximal (Padilla *et al.*, 2000 ; Bertucci *et al.*, 2007 ; Vogt, Schumacher, Blum, *et al.*, 2007 ; Vogt, Schumacher, Roecker, *et al.*, 2007).

Objectif : L'objectif de cette étude était d'analyser l'influence des conditions de pratique (laboratoire vs. terrain plat vs. terrain en montée) sur la $P_{méca}$ déterminée lors d'un test maximal de 4 min ($P_{méca-4min}$). Dans un second temps, la concordance avec un test incrémental classique réalisée en laboratoire a été étudiée.

Méthodes : 16 cyclistes de niveau hétérogène ont réalisé 6 sessions de tests, séparés d'au moins 48 h : un test incrémental en laboratoire sur un cyclo-ergomètre SRM (30 W / 2 min), deux tests maximaux d'habituance de 4 min sur le terrain et trois tests maximaux de 4 min dans un ordre randomisé en laboratoire sur cyclo-ergomètre, sur terrain plat et en montée (8%). Les cyclistes ont réalisé les tests sur le terrain avec un capteur de puissance Powertap. Afin d'être au plus proche des conditions réelles de pratique, ils pouvaient alterner les

positions assis et danseuse lors du test en montée. Les indices perceptifs (RPE et plaisir) étaient relevés toutes les minutes pendant les 4 min des tests afin d'évaluer la charge affective (Baron *et al.*, 2011).

Résultats : La $P_{méca-4min}$ était significativement supérieure en montée ($6,0 \pm 0,5 \text{ W.kg}^{-1}$) par rapport aux conditions sur cyclo-ergomètre (+8% ; $5.5 \pm 0.6 \text{ W.kg}^{-1}$) et sur terrain plat (+11% ; $5,4 \pm 0,5 \text{ W.kg}^{-1}$). La PMA évaluée lors du test incrémental était inférieure de 4% par rapport à la $P_{méca-4min}$ sur cyclo-ergomètre, de 2% par rapport à celle sur terrain plat et de 13% par rapport à celle en montée. Les stratégies de gestion de l'effort des cyclistes étaient différentes en fonction des conditions. La gestion de l'effort était similaire dans les deux conditions de terrain avec un départ rapide puis une décroissance de la $P_{méca}$ au cours des 3 premières minutes. En revanche, sur cyclo-ergomètre, la $P_{méca}$ était beaucoup plus stable dans la durée. Concernant la charge affective, elle était significativement plus élevée sur cyclo-ergomètre comparé au terrain plat (+171%) et en montée (+169%).

Discussion : Les principaux résultats ont montré que lors d'un test maximal sur 4 min, le niveau moyen de $P_{méca}$ était dépendant des conditions (laboratoire vs. terrain) et du profil du terrain. En effet, la $P_{méca-4min}$ en montée était significativement supérieure de 8 et 11% à celle des tests réalisés sur cyclo-ergomètre et sur terrain plat, respectivement. Ces différences peuvent être expliquées par la nature différente des résistances à l'avancement rencontrées. En effet, la résistance principale sur terrain plat est représentée par la traînée aérodynamique (Kyle et Burke, 1984) alors qu'en montée c'est davantage la gravité qui prend le dessus. En laboratoire, le système de freinage et les caractéristiques du volant d'inertie de l'ergomètre jouent également un rôle. Toutes ces conditions induisent des variations significatives de l'inertie ramenée au pédalier (crank inertial load), qui a pour conséquence de modifier les paramètres biomécaniques du pédalage (couple moteur, cadence de pédalage, rendement brut) (Fregly *et al.*, 1996 ; Hansen *et al.*, 2002 ; Bertucci *et al.*, 2007). Au niveau de la cadence de pédalage, les résultats obtenus sont en accord avec les précédentes études puisque la cadence sur cyclo-ergomètre était supérieure à celle sur terrain plat (+11%), toutes les deux supérieures à celle sur terrain montant (+30%) (Bertucci *et al.*, 2012 ; Emanuele et Denoth, 2012).

Les conditions de pratique avaient également une influence sur la stratégie de gestion de l'effort et sur la charge affective. En effet, on retrouve une différence significative pour ces deux paramètres entre les conditions de terrain et de laboratoire. La charge affective était plus élevée lors du test en laboratoire comparé à la condition réelle de locomotion sur le terrain à

plat et en montée avec beaucoup moins de plaisir dans l'effort sur cyclo-ergomètre. En revanche, dans cette dernière condition, la stratégie de gestion de l'effort était meilleure avec de plus faibles variations de $P_{méca}$ pendant les 4 min de l'effort maximal. La stratégie de gestion de l'effort en relation avec la charge affective témoignent de la part du contrôle cérébral dans la régulation d'un effort maximal (Hettinga *et al.*, 2007 ; Baron *et al.*, 2011).

Le test maximal sur terrain plat déterminait le niveau de $P_{méca}$ le plus proche (1,9%) de la PMA mesurée en laboratoire, comme cela l'avait été précédemment montré par Nimmerichter *et al.* (2010). La $P_{méca-4min}$ en montée était significativement supérieure de 13% montrant bien les limites de la mesure en laboratoire.

D'un point de vue pratique, cette étude a montré qu'il était important de prendre en considération le profil du terrain dans le processus de programmation des séances d'entraînement et plus particulièrement dans la définition des zones d'intensités déterminées à partir de la $P_{méca}$.

Conclusion : Cette étude a montré que le profil du terrain avait une grande influence sur la mesure de $P_{méca}$ lors d'efforts maximaux. Par conséquent, il est particulièrement important de bien prendre en considération les conditions de pratique lors de la réalisation de tests d'évaluation du potentiel physique mais également de bien calibrer les zones d'intensité en fonction du terrain sur lequel vont évoluer les athlètes.

Original paper: Dependency of pedalling condition in 4-min time trial test on maximal aerobic power

Abstract

The effect of pedalling condition on power output (PO) and maximal aerobic power (MAP) was analysed in different 4-min time trials (TT4). It was hypothesised that the nature of pedalling activity leads to changes in PO altering the pacing strategy used by cyclists. Sixteen male cyclists underwent three TT4 under different conditions: cycle ergometer (CE), level ground (LG), and uphill (UP). The comparison between the CE, LG, and UP tests indicates that PO was significantly higher in UP compared with CE (+8.0 % $p < 0.001$) and LG (+11.0 % $p < 0.001$). Correlations were observed for PO with a trivial effect size between MAP and CE TT4 ($R = 0.96$, $p < 0.001$) and LG TT4 ($R = 0.76$, $p < 0.05$). The results suggest that PO under CE and LG TT4 depends on the pedalling condition and is a relevant predictor of MAP even if the mean PO was highly influenced by the pacing strategy. It seems to be important to measure the MAP by taking into account the cycling conditions, considering that coaches and scientists use this parameter to assess the aerobic potential of athletes and determine the exercise intensities useful for monitoring adaptation to training.

Key Words: Cycling, power output, field test.

Introduction

In evaluating cycling performance, Nimmerichter *et al.* [25] recently showed that the power output (PO) developed during a 4-min time trial (TT4) in the field was a valid test and a good predictor of the maximal aerobic power (MAP) measured on an incremental exercise test (25 W/min). Indeed, previous studies have shown that the time during which VO_{2max} can be sustained (T_{MAP}) in cycling is located between 4 and 5 min [1, 6, 14, 29]. Thus, MAP determination on the field from a valid test appears to be relevant.

However, past studies have shown that the nature of terrain could play an important role on the PO during an individual time trial. Some authors have measured different POs between level ground and uphill road cycling conditions, but these comparisons were made for different durations. Indeed, Padilla *et al.* [26] investigated different types of time-trials among professional cyclists. Between a long time trial (3975 s) and an uphill time trial (4495 s), the authors reported a 4.5% (not significant) change in PO from 359 W to 376 W, respectively.

More recently, Vogt *et al.* [32, 33] investigated PO during the Tour de France and the 2005 Giro d'Italia. The maximal mean power (MMP) over a period of 240 s indicated PO increases of 3.6% and 13.4% under flat and mountain conditions during the Tour de France and the 2005 Giro d'Italia, respectively. The fact that PO was higher despite a longer duration of effort in the uphill time-trial suggests that higher PO can be produced [28] during uphill cycling. Moreover, the PO changes can be related to variations of the crank inertial load, which varies with the gear ratio and cyclist mass [16, 17, 20, 21], and these changes can influence the crank torque profile [4, 27]. Additionally, it is necessary to account for the manner in which the cyclist is able to mobilise the largest amount of metabolic energy during the maximal exercise. Indeed, in addition to the total amount of metabolic energy produced during the effort, the distribution of this energy is an important factor in performance [11, 12, 15, 31]. This ability, known as pacing strategy, is an important determinant of success in sporting competitions [23]. Therefore, it is essential to analyse this parameter during TT tests performed under different conditions. Finally, during a TT test, the cyclist must monitor not only the physiological reserves but also the affective loading (AL) to ensure that catastrophic failure of any physiological and emotional system does not occur before the finish time. Alternatively, AL may represent the part of brain control that contributes to pacing strategy regulation [2].

From these studies, it could be hypothesised that the PO level during a TT4 test could be dependent on both the pedalling condition and an athlete's pacing strategy. Thus, the value of MAP would be protocol-dependent, as demonstrated previously with different laboratory protocols [10]. Finally, it would be valuable and relevant to measure MAP under field conditions considering that in a laboratory, an ergometer does not offer the same mechanical properties as a classical race bicycle [17] and that the crank inertial load is not similar to road cycling locomotion.

This study aimed to analyse the effect of pedalling condition (laboratory *vs.* field) on the PO through different maximal TT4 tests and the agreement with MAP, as measured in an incremental exercise test in a laboratory. It was hypothesised that the PO would be dependent on the pacing strategy and nature of pedalling activity.

Methods

Subjects. Sixteen cyclists, ranging in competitiveness from the regional to the international level, volunteered to participate in the study. Their mean (SD) age, height, body mass, and

MAP were 19.8 (1.7) years, 179.1 (5.9) cm, 68.5 (6.1) kg, and 5.3 (0.6) W.kg⁻¹, respectively. The riders followed a regular training regimen and participated in races throughout the season. Prior to participating in any testing session, each subject provided written informed consent in accordance with the institutional Human Research Ethics Committee, and the study was performed in accordance with the ethical standards of the International Journal of Sports Medicine [22].

Experimental design. The study comprised four testing sessions separated by at least 48 h. During the first session, the subjects performed an incremental test to exhaustion on a cycle ergometer (CE) for determining the MAP. In the second session, the subjects performed two habituation tests on the field. Then, in the third, fourth, and fifth sessions, the subjects performed three maximal TT4 tests under different experimental conditions in a randomised order on the cycle ergometer (CE), level ground (LG), and uphill (UP) road (8.0%).

Incremental specific cycling test. The MAP was determined from the results of an incremental specific cycling test in the seated position on a SRM Indoor Trainer (Julich, Germany) equipped with clip-in pedals. The SRM system is considered valid for measuring the PO [18]. The initial workload was set at 100 W, and it was incremented by 30 W at intervals of 2 min. The choice of cadence was free. The test was performed until exhaustion, with both rate-perceived exertion (RPE) between 9 and 10 and a significant decrease in pedalling cadence. The MAP was determined as follows: when the final PO level was maintained over the duration (2 min), the MAP corresponded to the mean of this PO level. However, if the athlete could not sustain the required effort over the duration of the level, the MAP was calculated considering the mean PO of the lower and the final level: $MAP = PO_{\text{lower level}} + [(PO_{\text{final level}} - P_{\text{lower level}}) \times \text{Time}_{\text{final level}}]$.

The PO, heart rate (HR), and cadence were recorded throughout the test, while the RPE was measured subjectively using the Borg scale [8].

TT4 Tests. The subjects performed the maximal TT4 “”tests under three different experimental conditions: CE with an SRM Indoor Trainer, and LG and UP with a mobile power meter (Powertap, Madison, USA) and a power control (Garmin 500, Olathe, USA) mounted on their bikes. The validity of Powertap system determines an accuracy between 1–2% in comparison with the SRM reference system [3]. The CE and LG TT4 tests were performed in the seated position, whereas in UP test, the athletes could choose to ride in the seated and standing positions in the climbing test under actual performance conditions.

Measurements. During the four testing sessions, the PO (W), HR (bpm), and cadence (rpm) were measured continuously at a frequency of 1 Hz. Before each testing session, standardized directions for RPE and pleasure [2] were read for each subject. Accounting for the motivation in the pacing strategy process, we determined the AL as a difference between RPE and pleasure [2].

Statistical analysis. Descriptive statistics were used, and all data were expressed as mean \pm standard deviation (SD). Statistical analysis was performed using SigmaPlot 12.0 software (Systat Inc. San Jose, USA). A Kolmogorov-Smirnov-Lilliefors test was applied to ensure Gaussian distribution of all results. Two-way analysis of variance (ANOVA, time \times conditions) was used to analyse the influence of the exercise duration (time) under the different experimental conditions. When a significant effect was detected, a post-hoc comparison was made using the LSD Fisher test. The agreements between the incremental test and the TT4 tests were initially determined using linear regression, and Pearson's coefficient correlation (r) was expressed. Then, Bland and Altman's [7] method was used to compare the different methods of assessing PO and evaluate whether there was an agreement or bias among the methods. The limits of agreement were defined as means \pm 1.96SD. Additionally, we used effect size (ES, Cohen's d), which represents the ratio of the mean difference over the pooled variance, to estimate the magnitude of the difference. As Cohen proposed [9], the difference was considered trivial when $ES \leq 0.2$, small when $ES \leq 0.5$, moderate when $ES \leq 0.8$, and large when $ES > 0.8$. The coefficient of variation (CV) of PO was computed under the different conditions considered herein. Statistical significance was assumed for a p-value of less than 0.05.

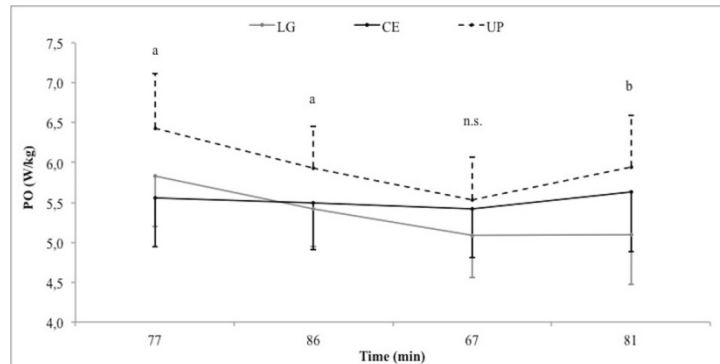
Results

Effect of cycling conditions on PO

The two-way analysis of variance indicates that there was no significant interaction between time and PO under all cycling conditions. However, time interacted with PO under the UP ($p < 0.05$) and LG ($p < 0.001$) conditions (fig. 1). The mean PO was significantly higher ($p < 0.001$) under UP ($6.0 \pm 0.5 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$) compared with that under CE (+8.0%) and LG (+11.0%).

Different pacing strategies were observed with a fast start under UP and LG and a final spurt under UP and CE (fig. 1). Indeed, during the first two-thirds of the effort, PO decreased gradually under UP compared with that under LG ($p < 0.05$) and CE ($p < 0.001$). This trend

was observed under LG, too. It appears that the pacing strategy under CE was the most consistent. The CV values of PO under UP (14.1%) and LG (14.5%) were higher than that under CE (6.8%).



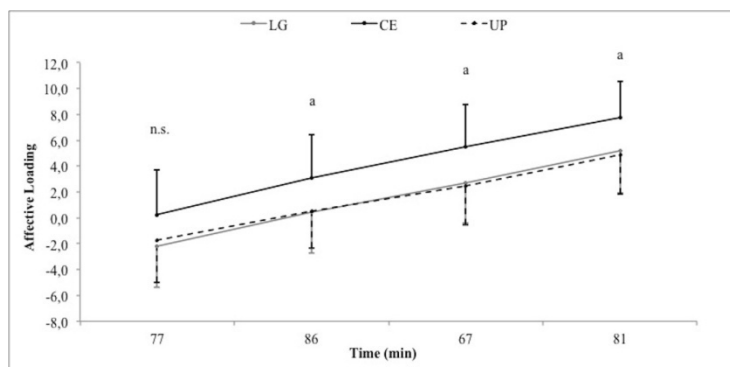
Effect of cycling conditions on heart rate and cadence

The results of two-way ANOVA indicate that there was no significant interaction of time with HR and cadence under all cycling conditions. However, there was an effect of time on HR ($p < 0.001$) under CE, LG and UP. The mean HR was not significantly different among the cycling conditions.

There was no effect of time on cadence. The mean cadence was significantly higher ($p < 0.001$) under CE (103.8 ± 6.8 rpm) compared with that under LG (+11.1%), and the latter was significantly higher ($p < 0.001$) than that under UP (+17.0%).

Effect of cycling conditions on affective load

The two-way ANOVA indicates that there was no significant interaction of time with PE, pleasure, and AL under all cycling conditions. However, there was an effect of time on AL ($p < 0.001$) (fig. 2) and PE ($p < 0.001$) under all conditions, but only on pleasure under CE ($p < 0.05$) and LG ($p < 0.05$). The mean PE was significantly higher under CE (7.1 ± 1.7) compared with that under LG (+18.3%) and UP (+16.4%), whereas the mean pleasure was significantly lower under CE (3.0 ± 2.0) compared with that under LG (-33.8%) and UP (-35.2%). In terms of the difference between PE and pleasure, the mean AL was significantly higher under CE (4.1 ± 3.2) compared with that under LG (+171.1%) and UP (+169.4%).



Comparison between MAP test and various TT4 tests

Table 1 lists the main results of the MAP test and the various TT4 tests for PO, HR_{max} , and cadence.

Table 1 Correlations, limits of agreement, and effect size for PO, HR_{max} , and cadence between the MAP test and the TT4 tests realised under the following experimental conditions: cycle ergometer (CE), level ground (LG), and uphill (UP).

| Condition | PO (W) | PO ($W \cdot kg^{-1}$) | HR_{max} (bpm) | Cadence (rpm) |
|----------------|------------------|--------------------------|------------------|-----------------|
| MAP Test | 360.8 ± 42.4 | 5.3 ± 0.6 | 191.2 ± 8.1 | |
| CE TT4 | 378.1 ± 50.9 | 5.5 ± 0.6 | 190.9 ± 5.9 | 103.8 ± 6.8 |
| Correlation | 0.96 ** | 0.94 ** | 0.75 * | |
| Bias | 17.4 | 0.2 | -0.3 | |
| LoA | -12.1–46.8 | -0.2–0.7 | -10.9–10.2 | |
| Effect Size | 0.18 | 0.20 | 0.02 | |
| Interpretation | Trivial | Trivial | Trivial | |
| LG TT4 | 367.3 ± 37.5 | 5.4 ± 0.5 | 183.2 ± 7.7 | 93.4 ± 6.4 |
| Correlation | 0.76 * | 0.71 * | 0.79 * | |
| Bias | 6.5 | 0.1 | -8.0 | |
| LoA | -49.0–62.0 | -0.7–0.9 | -18.0–2.0 | |
| Effect Size | 0.08 | 0.09 | 0.45 | |
| Interpretation | Trivial | Trivial | Small | |
| UP TT4 | 408.3 ± 45.2 | 6.0 ± 0.5 | 186.6 ± 6.1 | 79.9 ± 5.6 |
| Correlation | 0.89 ** | 0.87 ** | 0.75 * | |
| Bias | 47.5 | 0.7 | -4.6 | |
| LoA | -7.3–87.7 | -0.1–1.2 | -15.1–5.9 | |
| Effect Size | 0.48 | 0.54 | 0.31 | |
| Interpretation | Small | Moderate | Small | |

* Significant at $p < 0.05$; ** Significant at $p < 0.001$; LoA = Limits of Agreement

Discussion

The main findings of this study show that during a TT4 test, the PO is dependent on the total resistance to the locomotion, which alters the pacing strategy used by cyclists according to

their AL. PO appears to be a relevant predictor of MAP when the measurement is performed as a TT4 test under CE and LG.

The results indicate that the validity of the MAP measured via incremental exercise in a laboratory depended on the nature of the TT4 tests. The significant correlations and the trivial ES observed between MAP and PO under LG suggest that these two conditions are relevant for determining MAP in the field. The correlation between MAP and PO in the LG TT4 test agrees with the results of a previous study by Nimmerichter *et al.* [25] on performance assessment by means of an incremental test and maximal 4-min flat tests. Another recent study [19] validated a field protocol in a velodrome for measuring MAP comparing both laboratory and field incremental tests. However, the field assessment was realised under velodrome conditions, which cannot be integrated easily into athletes' training routines.

The changes in PO among the three conditions could likely be ascribed to the different resistances opposing locomotion. Indeed, under LG, the most important resistance is aerodynamic drag [24]; under UP, it is gravity, and under CE, it is the break of the ergometer. All these conditions involve changes in crank inertial load, which can alter the biomechanical (crank torque profile, preferred pedalling cadence, gross efficiency) and physiological measurement outcomes [3, 4, 16, 20, 21]. It has been shown previously that the cycling ergometers used in the laboratory generate different ranges of crank inertial load owing to different gear ratios and flywheel inertia [17]. Several professional cycling coaches who use PO measurements to optimise training sessions reported differences in performance according to the nature of the terrain. They observed that the measured performance under laboratory conditions was generally lower by 30–50 W over a 20-min time trial compared with that in training tests under outdoor conditions (especially under UP) [5]. In this study, PO in the UP TT4 test was 41 W (11.2%) upper compared in LG. This result is higher than the result of Padilla *et al.* [26] and Vogt *et al.* [32] who noted smaller differences of 4.5% and 3.6% respectively. However, this difference was in accordance with the results of another study by Vogt *et al.* [33], which was conducted during the 2005 Giro d'Italia (13.4%).

Because pedalling cadence was free, the results indicate significant differences in cadence under all cycling conditions. Our findings agree with those of Emanuele & Denoth [13] who studied the influence of road incline and body position on the power–cadence relationship, as well as with those of Bertucci *et al.* [5] who showed that the preferred pedalling cadence was higher under CE compared with that under LG (+11.1%) and UP (+30%). Finally, the mean

HR response measured during all TT4 tests followed a cardiovascular drift, but there was no significant difference among the conditions.

Time had no effect on the pacing strategy in the CE TT4 test, but its effect was observed under road cycling conditions in the LG ($p < 0.001$) and UP ($p < 0.05$) tests. The CV was lower under CE (6.8%) compared with that under LG (14.5%) and UP (14.1%). This suggests that the PO fluctuations were more important under road cycling conditions. Indeed, during field locomotion, cyclists must account for several environmental and topographic parameters, which may bring about changes in the resistances opposing the motion. Moreover, to maximise their level of performance, cyclists must race at the optimal intensity determined, in part, by the nature of the task and their own physiological and psychological capabilities.

AL increased linearly with duration ($p < 0.001$) under all conditions. This result is in accordance with the literature. Indeed, when exercise is maintained until fatigue, the induced physiological responses increase AL, thereby reducing the conscious desire to maintain the exercise intensity [2]. The athlete must monitor not only the physiological reserves but also AL to ensure that catastrophic failure of any physiological or emotional system does not occur before the end of the effort. Alternatively, AL may represent a part of brain control that contributes to pacing strategy regulation.

Likewise, AL was significantly higher ($p < 0.001$) under the CE indoor condition compared with the field conditions in the LG (+171.1%) and UP (+169.4%) tests. This is explained by both the higher PE and the lower pleasure in this mode of locomotion. The higher AL under CE could be because of changes in mechanoreceptor stimulation in the lower limbs due to the specific pedalling biomechanics on the ergometer [4, 27]. Indeed, under CE, the cyclists did not exercise in their usual pedalling condition, and this could have affected their PE and pleasure. Another possible reason for the different PE and pleasure found under CE could be changes in the exercise environment. As Rejeski stated [30], the preference of an individual for a particular mode of exercise has a major influence on PE. Indeed, if an individual views a particular activity as distasteful, they might rate that activity as requiring greater effort than other activities of equal intensity.

In conclusion, this study showed that the PO in a TT4 test depends on both the pedalling condition and the associated pacing strategy established by the cyclist. It is a relevant predictor of MAP when measured under the CE and LG conditions. Accordingly, it seems to be important to measure MAP by accounting for the cycling conditions considering that this

parameter is used by coaches and scientists to assess the aerobic potential of athletes and to determine exercise intensities useful for monitoring adaptation to training.

References

Allen H, Coggan AR. Training and racing with a powermeter. Boulder, Colorado: VeloPress 2010

Baron B, Moullan F, Deruelle F, Noakes TD. The role of emotions on pacing strategies and performance in middle and long duration sport events. *Br J Sports Med* 2011; 45(6): 511-7

Bertucci W, Duc S, Villerius V, Pernin JN, Grappe F. Validity and reliability of the powertap mobile cycling powermeter when compared the SRM device. *Sports Med* 2005; 26: 868-873

Bertucci W, Grappe F, Gros Lambert A. Laboratory versus outdoor cycling conditions: differences in pedaling biomechanics. *J Appl Biomech* 2007; 23(2): 87-92

Bertucci W, Betik A, Duc S, Grappe F. Gross efficiency and cycling economy are higher in the field as compared to on an Axiom stationary ergometer. *Journal of Applied Biomechanics* 2010 in press

Billat V, Faina M, Sardella F, Marini C, Fanton F, Lupo S, Faccini P, De Angelis M, Koralsztein JP, Dalmonte A. A comparison of time to exhaustion at VO_2max in elite cyclists, kayak paddlers, swimmers and runners. *Ergonomics* 1996; 39: 267-277

Bland JM, Altman DG. Comparing methods of measurement: why plotting difference against standard method is misleading. *Lancet Medical Journal* 1995; 346: 1085-1087

Borg G. CR10 Scale, Gunnar Borg, 1981, 1982, 1998

Cohen J. Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences. Hillsdale 1988: Lawrence Erlbaum Associates.

Davis JA, Whipp BJ, Lamarra N, Huntsman DJ, Frank MH, Wasserman K. Effect of ramp slope on determination of aerobic parameters from the ramp exercise test. *Med Sci Sports Exerc* 1982; 14(5): 339-43

De Koning JJ, Bobbert MF, Foster C. Determination of optimal pacing strategy in track cycling with an energy flow model. *J Sci Med Sport* 1999; 2(3): 266-77

De Koning JJ, Foster C, Lampen J, Hettinga F, Bobbert MF. Experimental evaluation of the power balance model of speed skating. *J Appl Physiol* 2005; 98(1): 227-33

Emanuele U, Denoth J. Influence of road incline and body position on power-cadence relationship in endurance cycling. *Eur J Appl Physiol* 2012; 112(7): 2433-41

Faina M, Billat V, Squadrone R, De Angelis M, Koralsztein JP, Dal Monte A. Anaerobic contribution to the time to exhaustion at the minimal exercise intensity at which maximal oxygen uptake occurs in elite cyclists, kayakists and swimmers. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1997; 76(1): 13-20

Foster C, Schrager M, Snyder AC, Thompson NN. Pacing strategy and athletic performance. *Sports Med* 1994; 17(2): 77-85

Fregly BJ, Zajac FE, Dairaghi CA. Crank inertial load has little effect on steady-state pedaling coordination. *Journal of Biomechanics* 1996; 29: 1559-1567

Fregly BJ, Zajac FE, Dairaghi CA. Bicycle drive system dynamics: theory and experimental validation. *Journal of Biomechanical Engineering* 2000; 122: 446-452

Gardner AS, Stephens S, Martin DT, Lawton E, Lee H, Jenkins D. Accuracy of SRM and Powertap power monitoring systems for bicycling. *Med Sci Sports & Exerc* 2004; 36: 1252-1258

Gonzales-Haro C, Galilea PA, Drobnic F, Escanero JF. Validation of a field test to determine the maximal aerobic power in triathletes and endurance cyclists. *Br J Sports Med* 2007; 41: 174-179

Hansen EA, Jorgensen LV, Jensen K, Fregly BJ, Sjogaard G. Crank inertial load affects freely chosen pedal rate during cycling. *Journal of Biomechanics* 2002; 35: 277-285

Hansen EA, Jorgensen LV, Jensen K, Fregly BJ, Sjogaard G. Erratum to: Crank inertial load affects freely chosen pedal rate during cycling. [*Journal of Biomechanics* 2002; 35: 277-285]. *Journal of Biomechanics* 2002; 35: 1521

Harriss DJ, Atkinson G. Update - Ethical Standards in Sport and Exercise Science Research. *Int J Sports Med* 2011; 32: 819-821

Hettinga FJ, De Koning JJ, Meijer E, Teunissen L, Foster C. Effect of pacing strategy on energy expenditure during a 1500m cycling time trial. *Med Sci Sports Exerc* 2007; 39(12): 2212-2218

Kyle CR, Burke ER. *Improving the racing bicycle.* Mechanical Engineering 1984; September, 34-45

Nimmerichter A, Williams C, Bachl N, Eston R. Evaluation of a Field Test to Assess Performance in Elite Cyclists. *Int J Sports Med* 2010; 31: 160-166

Padilla S, Mujika I, Orbananos J, Angulo F. Exercise intensity during competition time trials in professional road cycling. *Med Sci Sports Exerc* 2000; 32(4): 850-6

Patterson RP, Pearson JL. The influence of flywheel weight and pedaling frequency on the biomechanics and the physiological responses to bicycle exercise. *Ergonomics* 1983; 26: 659-668

Pinot J, Grappe F. The Record Power Profile to assess Performance in Elite Cyclists. *Int J Sports Med* 2011; 32: 839-844

Pinot J, Grappe F. Determination of maximal aerobic power on the field in cycling. *Journal of Science and Cycling* 2014; in press

Rejeski WJ. Perception of exertion: A social psycho-physiological integration. *Journal of Sport & Exercise Psychology* 1981; 3: 305-320

Van Ingen Schenau GJ, Cavanagh PR. Power equations in endurance sports. *J Biomech* 1990; 23(9): 865-81

Vogt S, Schumacher YO, Blum A, Roecker K, Dickhuth HH, Schmid A, Heinrich L. Cycling power output produced during flat and mountain stages in the giro d'Italia: a case study. *J Sports Sci* 2007; 25(12): 1299-305

Vogt S, Schumacher YO, Roecker K, Dickhuth HH, Schoberer U, Schmid A, Heinrich L. Power output during the Tour de France. *Int J Sports Med* 2007; 28(9): 756-61

CHAPITRE 6 : Etude de la technique en danseuse en rapport à la $P_{méca}$ développée au niveau du centre de masse et celle utile à l'avancement

Les résultats de ce travail ont fait l'objet d'un article soumis dans la revue *Medicine and Science in Sports and Exercise* : « World-class climber has a more efficient standing technique in uphill cycling ».

Résumé détaillé

World-class climber cyclist has a more efficient standing technique in uphill cycling

Pinot J, Candau R, Rinaldi K et Grappe F

Etat de l'art : En montée, l'étude de la position du cycliste est un paramètre important sur lequel la littérature scientifique reste pauvre. Bien que plusieurs études se soient intéressées à analyser les différences physiologiques entre les positions assis et danseuse (Swain et Wilcox, 1992 ; Tanaka *et al.*, 1996 ; Millet *et al.*, 2002 ; Fonda et Šarabon, 2012) , leurs résultats divergent sans prendre en considération les différences interindividuelles comme le niveau de pratique, les qualités du cycliste ou son profil performance en compétition. Il est clairement établi que la position en danseuse favorise les performances sur des efforts courts et intensifs (Millet *et al.*, 2002 ; Hansen et Waldeland, 2008) alors que les résultats sont contradictoires quand à la stratégie la plus efficace dans le choix entre les deux postures sur les efforts plus longs à intensité constante. Dans ce sens, notre précédente étude a montré que la $P_{méca}$ mesurée lors d'un test maximal 4 min en montée était supérieure à celle mesurée sur le plat alors que les cyclistes avaient la possibilité d'alterner les positions assis et danseuse. A haut niveau, il n'y a pas de règle commune entre les grimpeurs de classe mondiale, certains étant souvent en danseuse alors que d'autres très rarement. A notre connaissance, aucune étude n'a rapporté une technique en danseuse plus efficace chez des cyclistes de haut niveau. L'analyse du mouvement du centre de masse (CM) pour évaluer le travail potentiel (W_{pot}) et cinétique (W_{cin}) chez des cyclistes devrait permettre d'apporter une meilleure compréhension de la technique utilisée en danseuse. En effet, l'évolution des niveaux d'énergie cinétique et potentielle du CM permet de déterminer le travail mécanique externe (W_{ext}) produit par le

cycliste qui représente un paramètre majeur du travail mécanique de la locomotion (Cavagna, 1975 ; Pfau *et al.*, 2005).

Objectif : L'objectif de cette étude était de comparer la $P_{\text{méca}}$ externe du centre de masse ($P_{\text{méca-CM}}$), l'efficacité mécanique (EM) et le transfert entre les énergies potentielle et cinétique (TE) en position de danseuse lors d'un effort en montée à intensité soutenue sur différentes pentes entre un cycliste de classe mondiale et un groupe de cyclistes élités non grimpeurs. L'hypothèse de départ était que la technique en danseuse utilisée par le cycliste de classe mondiale pouvait être particulière en optimisant l'EM et les mécanismes de conservation de l'énergie en transformant l'énergie potentielle en cinétique.

Méthodes : Un grimpeur de classe mondiale et 12 cyclistes de haut niveau ont participé à cette étude. La mesure de $P_{\text{méca-CM}}$ a été réalisée à l'aide d'un bras cinématique (Belli *et al.*, 1992). L'exercice se déroulait avec le vélo personnel de chaque cycliste équipé d'une roue arrière possédant un capteur de puissance Powertap sur un tapis roulant motorisé. Après une séance d'habituance sur le tapis, chaque cycliste effectuait 4 paliers de 2 min sur 4 pentes différentes (5, 7, 9 et 11%) à des vitesses normalisées en fonction d'une $P_{\text{méca}}$ constante équivalente à 4,6 W/kg. Trois enregistrements de 8 sec en position de danseuse étaient effectués lors de chaque palier. $P_{\text{méca-CM}}$ était obtenue à partir de la mesure du bras cinématique qui permettait de calculer les niveaux d'énergie potentielle et cinétique en danseuse. L'indice d'EM était calculé à partir du ratio entre la $P_{\text{méca}}$ effective mesurée par le capteur de puissance et $P_{\text{méca-CM}}$ alors que l'indice de TE était obtenu à partir des calculs des $P_{\text{méca-pot}}$ et $P_{\text{méca-cin}}$.

Résultats : Les paramètres biomécaniques différaient entre le grimpeur de classe mondiale et les cyclistes élités non grimpeurs en position de danseuse. La $P_{\text{méca-CM}}$ diminuait significativement en fonction de la pente pour les non-grimpeurs alors qu'elle avait tendance à augmenter pour le grimpeur de classe mondiale. Sur les pentes de 5 - 7%, la $P_{\text{méca-cin}}$ était deux à quatre fois supérieure à $P_{\text{méca-pot}}$ chez les non-grimpeurs alors qu'elle était similaire chez le grimpeur de haut niveau. Sur les pentes de 5 - 7%, l'EM du grimpeur était significativement supérieure à celle des non grimpeurs (+115% sur les pentes de 5% et +88% sur les pentes de 7%) alors que sur les pentes de 9 - 11%, l'EM du grimpeur était légèrement inférieure respectivement de 22 et 24%. En ce qui concerne l'indice de TE, il était beaucoup plus élevé chez le grimpeur de classe mondiale sur les pentes de 5 - 7% (+299% et +514%). Il semble que EM soit positivement corrélé aux TE, mais les corrélations obtenues n'étaient pas significatives ($p = 0,15$) à la fois pour le grimpeur et les non-grimpeurs.

Discussion : Cette étude originale est la première à mesurer $P_{\text{méca-CM}}$ en cyclisme en conditions réelles de pratique sur un tapis roulant. Les importantes différences interindividuelles dans les variables biomécaniques en danseuse ont montré qu'il existe un grand nombre de techniques utilisées par les cyclistes en montée lors d'efforts soutenus. Ces observations vont dans le sens de l'étude de Millet *et al.* (2002) qui suggérait que les caractéristiques techniques et le niveau d'expertise avaient une influence sur la dépense énergétique en position de danseuse.

Les adaptations biomécaniques étaient différentes entre le grimpeur de classe mondiale et les cyclistes non-grimpeurs en fonction de la pente pour une même intensité d'effort. L'EM de l'ensemble des cyclistes se situait entre 23% et 52%. Ce résultat montre qu'en danseuse, les mouvements du CM produisent une importante quantité de travail externe, largement supérieur au travail effectif mesuré au niveau du vélo.

De manière surprenante, en montée, le W_{cin} des non-grimpeurs était toujours supérieur au W_{pot} , alors que ce fut uniquement le cas dans les pentes les plus raides (9 - 11%) pour le grimpeur de haut niveau. Cette variation plus élevée de l'énergie cinétique par rapport à l'énergie potentielle est une caractéristique importante du cyclisme en montée, directement relié à l'efficacité du cycle de pédalage et à la transmission des forces au niveau de la pédale.

Sur les pentes les plus couramment rencontrées en compétition (5 - 7%), le grimpeur de classe mondiale avait une EM et un TE significativement plus élevé. Il semble qu'il existe une tendance montrant une relation pertinente entre l'EM et le TE pour tous les cyclistes, suggérant que plus le TE est élevé, plus l'EM augmente. Ainsi, il apparaît que la principale différence résiderait dans une plus grande capacité à transférer l'énergie potentielle en cinétique avec une cadence optimale, ce qui était le cas du grimpeur de classe mondiale sur les pentes de 5 - 7%. Sur les pentes les plus raides (9 - 11%), l'EM et les TE du grimpeur de classe mondiale étaient altérés. Il semble que cela soit dû à la diminution de la cadence.

Ainsi, une technique en danseuse efficace semble être reliée avec une EM et un TE élevés associés à une cadence optimale en fonction de la pente. Sur les pentes les plus élevées, la technique en danseuse du grimpeur est apparue moins efficace alors que le RPE était constant. Ce constat suggère que sur les pentes raides avec des cadences plus faibles, le grimpeur de classe mondiale utilise une technique en danseuse qui pourrait favoriser le phénomène d'un cycle étirement-détente au niveau des membres inférieurs, comme cela l'a déjà été observé en cyclisme précédemment (Hull et Hawkins, 1990 ; Bini et Diefenthaler,

2009). Cette supposition demande évidemment à être scientifiquement confirmée dans d'autres études.

Conclusion : Le résultat principal de cette étude montre que lors d'un effort soutenu en montée, une technique en danseuse efficace, comme celle du grimpeur de classe mondiale, semble être associée à une EM et un TE élevés. Comparé aux cyclistes élites non grimpeurs, le grimpeur de classe mondiale possède une technique en danseuse plus efficace sur les pentes les plus couramment rencontrées de 5 et 7% avec des cadences élevées. De futures études sont nécessaires pour relier EM et TE avec le coût énergétique du déplacement en danseuse.

Medicine & Science in Sports & Exercise

World-class climber cyclist has a more efficient standing technique in uphill cycling

--Manuscript Draft--

| | |
|---|---|
| Manuscript Number: | |
| Full Title: | World-class climber cyclist has a more efficient standing technique in uphill cycling |
| Short Title: | Standing technique of a world-class cyclist |
| Article Type: | Original Investigation |
| Keywords: | ELITE CYCLISTS BIOMECHANICS PEDALING TECHNIQUE UPHILL TERRAIN PERFORMANCE |
| Corresponding Author: | Julien Pinot EA 4660, Health – Sport Department, Culture - Sport - Health - Society Besancon, FRANCE |
| Corresponding Author Secondary Information: | |
| Corresponding Author's Institution: | EA 4660, Health – Sport Department, Culture - Sport - Health - Society |
| Corresponding Author's Secondary Institution: | |
| First Author: | Julien Pinot |
| First Author Secondary Information: | |
| Order of Authors: | Julien Pinot Robin Candau, PU Kevin Rinaldi Frederic Grappe, PhD |
| Order of Authors Secondary Information: | |
| Abstract: | <p>Purpose: The purpose of this study was to compare the external mechanical power of the center of mass (PCM-ext), the mechanical efficiency (ME), and transfers between potential and kinetic energy (ET) in the standing position between a world-class (WC) climber and a group of non-climber elite cyclists. Methods: A WC climber, top-ten finisher of Grand Tours, and 12 high-level cyclists performed three bouts of 30 seconds in the standing position on a motorized treadmill at four slopes (5, 7, 9, and 11%) and at a moderate intensity (4.6 W/kg). The ME and ET in the standing position were calculated by using the effective power output (Pbike), measured by a PowerTap hub, and the PCM-ext, measured from a kinematic arm (KA) that measured the displacement of the cyclist's CM. Results: The biomechanical variables differ between the WC climber and the non-climber cyclists in the standing position. The PCM-ext decreased significantly according to the slope ($r=-0.98$, $p<0.05$) for the non-climber cyclists whereas it tended to increase for the WC climber. The results highlight that on the slopes of 5-7%, the PCM-kin for the no-climber cyclists was twice to four times higher than the PCM-pot, while for the WC climber, the PCM-kin and PCM-pot were similar. Furthermore on these slopes, the ME and ET of the WC climber were two and five times higher, respectively than those of the non-climber cyclists. Conclusion: This study demonstrated that during uphill cycling an efficient standing technique seems to be associated with high ME and ET. The results show that compared to the non-climber cyclists, the WC climber has a more efficient standing technique on the most frequently encountered slopes (5-7%).</p> |

Title: World-class climber cyclist has a more efficient standing technique in uphill cycling

ABSTRACT

Purpose: The purpose of this study was to compare the external mechanical power of the center of mass (P_{CM-ext}), the mechanical efficiency (ME), and transfers between potential and kinetic energy (ET) in the standing position between a world-class (WC) climber and a group of non-climber elite cyclists. **Methods:** A WC climber, top-ten finisher of Grand Tours, and 12 high-level cyclists performed three bouts of 30 seconds in the standing position on a motorized treadmill at four slopes (5, 7, 9, and 11%) and at a moderate intensity (4.6 W/kg). The ME and ET in the standing position were calculated by using the effective power output (P_{bike}), measured by a PowerTap hub, and the P_{CM-ext} , measured from a kinematic arm (KA) that measured the displacement of the cyclist's CM. **Results:** The biomechanical variables differ between the WC climber and the non-climber cyclists in the standing position. The P_{CM-ext} decreased significantly according to the slope ($r=-0.98$, $p<0.05$) for the non-climber cyclists whereas it tended to increase for the WC climber. The results highlight that on the slopes of 5-7%, the P_{CM-kin} for the no-climber cyclists was twice to four times higher than the P_{CM-pot} , while for the WC climber, the P_{CM-kin} and P_{CM-pot} were similar. Furthermore on these slopes, the ME and ET of the WC climber were two and five times higher, respectively than those of the non-climber cyclists. **Conclusion:** This study demonstrated that during uphill cycling an efficient standing technique seems to be associated with high ME and ET. The results show that compared to the non-climber cyclists, the WC climber has a more efficient standing technique on the most frequently encountered slopes (5-7%).

Keywords: ELITE CYCLISTS; BIOMECHANICS; PEDALLING TECHNIQUE; UPHILL TERRAIN PERFORMANCE.

INTRODUCTION

In the optimization approach of cycling performance, the cyclist's position on the bicycle is an important parameter in which the sport sciences literature remains poor, especially for uphill terrains. Although numerous studies have attempted to analyze the physiological differences between seated and standing cycling (Swain et Wilcox, 1992 ; Tanaka *et al.*, 1996 ; Millet, Tronche, *et al.*, 2002 ; Fonda et Šarabon, 2012), their conflicting results did not take

into account the inter-individual differences due to the level of practice, the skills of the cyclists, and their profile. It is well-established that the standing position favors performance during intensive bouts of uphill cycling (Millet, Tronche, *et al.*, 2002 ; Hansen et Waldeland, 2008). However, during uphill steady-state cycling, the results are contradictory on the most efficient strategy in the choice between the two postures. When a cyclist climbs a hill, he may stand or remain seated according to many factors, such as the gradient and the length of the hill, available gearing, pacing strategy, individual experience, body morphology and preference (Harnish *et al.*, 2007). Physiological factors such as energy cost, local muscle fatigue, and muscle perfusion could also determine the choice between seated and standing cycling performance (Millet, Tronche, *et al.*, 2002).

In high-level cycling, there is no common rule among the best world-class (WC) cycling climbers. Some remain seated and stand up when they attack, whereas others prefer switching between standing or seated positions in various proportions. Likewise, to the best of our knowledge, no systematic studies have reported any characterization of an efficient standing technique or a technique used by WC climbers. Several studies described generalities of the standing position in comparison with the seated posture. Simple visual observations reveal that cyclists use different techniques in the standing position, and during the uphill steady-state, the time spent in the seated or standing positions varies. Some WC climbers are able to stay in the standing position a relatively long time, indicating that their technique is certainly optimized for efficiency. An efficient technique could correspond to the implementation of coordination patterns in order to optimize both the ratio between the effective work and the total work, that is, the mechanical efficiency (ME), and the exchanges between potential and kinetic energy (ET). To the best of our knowledge, no study has investigated the biomechanical analysis of body movements between a WC climber and non-climber elite cyclists at a moderate intensity commonly used in mountain ascents. Analyzing the motion of the center of mass (CM) to assess the potential (W_{pot}) and kinetic works (W_{kin}) in a WC climber and comparing this to non-climber elite cyclists would allow for a better understanding of the technique used in the standing position. Indeed, the changes in the potential and kinetic energy levels of the CM allow for determining the external mechanical work (W_{ext}) performed by the cyclist during the cyclic movement, with W_{ext} representing a major component of the mechanical work of locomotion (Cavagna, 1975 ; Pfau *et al.*, 2005).

The purpose of this study was to compare the external mechanical power of the CM ($P_{\text{CM-ext}}$), ME, and ET in the standing position according to different slopes (5, 7, 9, and 11%) between a WC climber and a group of non-climber elite cyclists at a moderate intensity commonly

used in mountain ascents. The P_{CM-ext} was computed using a kinematic arm (KA) that measured the displacement of the cyclist's CM in the standing position on a treadmill. We hypothesized that the mechanical energy associated with the oscillatory movements of the WC climber's body is singular and optimizes the ME and the mechanisms of energy conservation by transforming the potential energy into kinetic energy. Thus, WC climber would have his own technique compared to the other cyclists.

METHODS

Subjects

A WC climber cyclist, top-ten finisher of Grand Tours (Tour de France and Vuelta a España) and World Tour stage races, volunteered to participate in this study. His age, height, body mass and maximal oxygen consumption were 23 yrs, 1.80 m, 65 kg, and 85 mL/min/kg, respectively. The population of non-climber cyclists was composed of 12 trained, healthy, male, high-level cyclists belonging to professional teams or ranked among the highest amateur level of the country. The age, height, and body mass of the tested subjects were 23 ± 4 (mean \pm SD) yrs, 1.77 ± 0.06 m, and 66 ± 8 kg, respectively. Before the experiment, each subject received full explanations concerning the nature and the purpose of the study. The participants provided written informed consent to participate in this study, which was approved by a University Human Research Ethics Committee. The study meets the international ethical standards described by the Declaration of Helsinki of the World Medical Association .

Experimental design

The study comprised one testing session in which each subject cycled with his own racing bicycle on a large motorized treadmill (S 1930, HEF Techmachine, Andrezieux-Bouthéon, France) of 3.8 m length and 1.8 m width at different slopes (5, 7, 9, and 11%). Slopes of 5-7% are mainly observed in mountain ascents in competitions such as the Tour de France. Slopes of 9-11% are more commonly observed in several mountain ascents in Spain and Italy. The bicycle tire pressure was inflated to 700 kPa.

Before testing, all the subjects performed several trials on the motorized treadmill to get used to the equipment. The protocol started when the subjects felt comfortable in the standing position as in real locomotion. We verified this by the mean of a standard comfort scale,

graduated from 0, "I feel uncomfortable", to 10, "I feel perfectly comfortable", and started when they gave a rating of at least 8.

Power output measurements

Each bike was fitted with the same rear wheel composed of a PowerTap hub (CycleOps, Madison, USA). The PowerTap device is a valid and reliable mobile power meter that measures the power output (P_{bike}) inside the hub, the velocity, and the pedaling cadence. (Gardner *et al.*, 2004 ; Bertucci *et al.*, 2005).

Kinematic arm measurements

The KA method measures the body displacements in the three spatial dimensions at the pelvis level (Belli *et al.*, 1992 ; Belli *et al.*, 1993 ; Belli *et al.*, 1995 ; Bourdin *et al.*, 1995 ; Candau *et al.*, 1998). The KA allows for performing computations of velocities, accelerations, forces, and one other important application of this approach, which is the quantification of W_{ext} and $P_{\text{CM-ext}}$. The KA consists of four rigid bars linked together by three mono-axial joints. One end of the KA was connected to a reference point (reference end) and the other end moved freely in the three spatial directions (moving end). At each joint, an optical transducer interfaced to a personal computer measured the joint angles. Knowing the bar lengths and the joint angles, an appropriate trigonometric equation could be applied to compute the instantaneous position of the moving end relative to the reference end. The KA principle and its validation have been described in detail in previous studies (Belli *et al.*, 1992 ; Belli *et al.*, 1993 ; Belli *et al.*, 1995 ; Bourdin *et al.*, 1995 ; Candau *et al.*, 1998). In order to apply the KA method to cycling, the measuring end of the KA was linked to the subject by means of a belt fastened around his waist, while the reference end was fixed to the ceiling (Figure 1). The displacement of the treadmill belt was measured using an extra optical encoder fixed to a wheel mounted on the treadmill belt with an accuracy of 0.1 mm. The velocity of the treadmill was obtained by a first-order digital derivation of the displacement signal. The signals were recorded on a personal computer (Victor 486 SX33) through a 12-bit data-conversion system especially designed for this purpose.

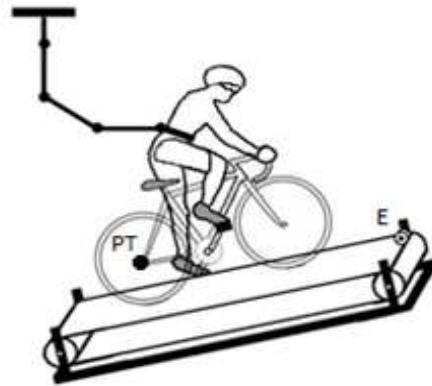


Figure 1: Illustration of the cyclist fitted with the kinematic arm around his waist on the treadmill; the caster *E* represents the extra optical encoder fixed to the wheel mounted on the treadmill belt and the PowerTap hub is schematized by the circle *PT* at the rear wheel.

Standing cycling trials

The testing protocol consisted of four consecutive trials of five minutes' uphill cycling at the four slopes. The order of trials at each gradient were randomized in order to avoid any tiredness effect the more the slope increased. The speed of the treadmill was individualized during each trial such that each subject performed at the target power output of 4.6 W/kg. This intensity corresponded to a moderate intensity for everyone, that is, an intensity that can be sustained for at least one hour and commonly used in mountain ascents. At the end of each trial, the subjects indicated their rating of perceived exertion (RPE) using the Borg CR10 scale (Borg, 1990). All subjects were equipped with the same gear cluster, which included a 27 cog that produced a minimum gear size of 3.03 m per pedal revolution. This cluster is the one usually used by cyclists in training and competition. The subjects could choose their preferred cadence but they had to keep the same gear ratio on each slope.

In each trial, the subjects realized three bouts of 30 seconds in the standing position, alternating with the seated position in order to mimic real locomotion. The KA measurements were performed only during each standing bout. The sampling duration and frequency were 8 s and 100 Hz, respectively. The PowerTap data were collected during the same time. At the end of the session, 12 files of the KA and 12 bouts in the PowerTap file were collected and analyzed.

Quantification of the mechanical external power of CM

The anatomical localization of the CM is complex because of the possible tilting movements of the trunk. We observed that they were limited; thus, we assumed that the waist movements were a reasonable approximation of the CM displacements as proposed by Fenn (Fenn, 1930),

and based on trigonometric equations that have been described in detail by Belli *et al.* (1992), the position of the CM was computed.

During human locomotion, potential (W_{pot}) and kinetic works (W_{kin}) correspond to positive potential and kinetic energy changes (Cavagna, 1975). W_{pot} and W_{kin} of the CM are obtained from the vertical position (h), and the horizontal velocity of the CM (v), respectively:

$$W_{pot} = m_b g (h_{max} - h_{min})$$

$$W_{kin} = 0.5 m_b (v_{max}^2 - v_{min}^2)$$

where m_b is the body mass (kg), g is the acceleration due to gravity ($9.81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$), h_{max} and h_{min} are the maximal and minimal heights of the CM (m) according to the vertical displacements relative to the ground and the elevation with the slope of the climb, respectively, and v_{max} and v_{min} are the maximal and the minimal horizontal velocities of the CM (m/s).

The instantaneous external mechanical energy was calculated by the addition of the potential and kinetic energy levels. Then, W_{ext} was calculated from the positive external mechanical energy changes. The mechanical external power of the CM (P_{CM-ext}), potential power (P_{CM-pot}), and kinetic power (P_{CM-kin}) were calculated (in W/kg) as follows:

$$P_{CM-ext} = W_{ext} / t$$

$$P_{CM-pot} = W_{pot} / t$$

$$P_{CM-kin} = W_{kin} / t$$

where t represents the time for one-half revolution of pedal.

The index of ME was calculated as the ratio between the effective power (i.e., P_{bike} , and P_{CM-ext}). The index of ET was obtained as follow:

$$ET = 1 - [P_{CM-ext} / (P_{CM-pot} + P_{CM-kin})]$$

Statistics

Statistical analysis was performed using SigmaPlot 12.0 software (Systat Inc., San Jose, USA). Descriptive statistics were used and all data were expressed as mean \pm standard deviation, [min - max], (coefficient of variation). Pearson zero-order correlation coefficients were computed by the least-squares method to describe the relationship between selected variables. The normality of values distributions were assessed with the Kolmogorov-Smirnov test. One-way analysis of variance (ANOVA) was used to analyze the differences of P_{CM-ext} according to the slope in the group of non-climber cyclists. When a significant effect was

detected, a post-hoc comparison was made using Fisher's least significant difference test. The statistical significance was set at $p < 0.05$.

RESULTS

An example of variations in the potential, kinetic, and external energy levels of the CM, during one revolution of pedal, is given for a representative subject in Figure 2. There were marked differences between the kinetic and potential energy levels. This is emphasized by the scales shown in Figure 2. The kinetic energy was maximal when the crank was horizontal, whereas it was minimal during the phases of low and high transitions (Hull *et al.*, 1990). Potential and kinetic energies were partly out of phase indicating the occurrence of an energy transfer mechanism during cycling.

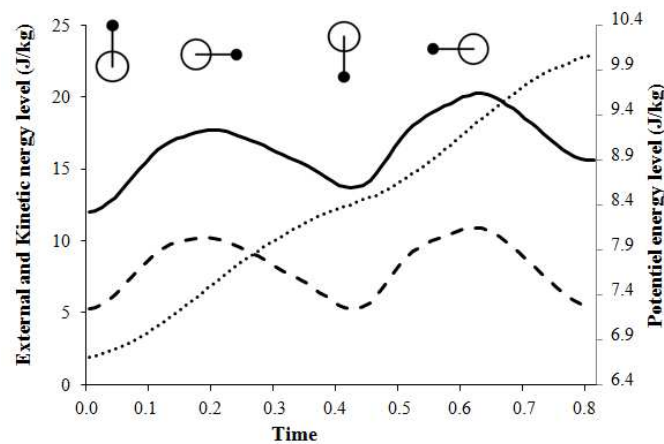


Figure 2: Example of the potential (dotted line), kinetic (dashed line), and external (solid line) energy levels during a pedal revolution at a slope of 9%.

A detailed analysis of biomechanical parameters for the group of non-climber cyclists and for the WC cycling climber is presented in Table 1. In the group of non-climber cyclists, the P_{CM-ext} was five to two times higher than the P_{bike} , respectively at 5% and 11%. The P_{CM-ext} decreased significantly according to the slope ($r = -0.98$, $p < 0.05$), whereas the P_{bike} remained unchanged. For the WC climber, the P_{CM-ext} was not significantly altered by the slope. There were important inter-individual differences in the P_{CM-ext} values for the non-climber cyclists since the coefficients of variation ranged from 35% to 52%. For the non-climber cyclists, the P_{CM-kin} were two to four times higher than the P_{CM-pot} , while for the WC climber, the P_{CM-kin} and P_{CM-pot} were similar on slopes of 5-7%. The preferred cadence decreased significantly

according to the slope for the non-climber cyclists ($r = -0.97, p = 0.01$) and the WC climber ($r = -0.98, p = 0.01$).

Table 1: Mean power values of the non-climber cyclists and the WC climber according to the slopes (* significantly different). Values of the group are expressed as mean \pm SD, [min - max], (CV).

| (W/kg) | 5% | | 7% | | 9% | | 11% | |
|---------------------------|---|------------|---|-------------|---|-------------|---|-------------|
| | No-climbers | WC climber | No-climbers | WC climber | No-climbers | WC climber | No-climbers | WC climber |
| P_{bike} | 4.6 \pm 0.3 [4.3 - 5.0] (5%) | 4.6 | 4.6 \pm 0.2 [4.3 - 4.8] (7%) | 4.5 | 4.6 \pm 0.2 [4.5 - 4.9] (6%) | 4.6 | 4.7 \pm 0.2 [4.5 - 4.9] (6%) | 4.7 |
| P_{CM-ext} | 19.9* \pm 10.4 [7.1 - 33.2] (52%) | 9.2 | 16.6 \pm 7.6 [6.6 - 28.8] (46%) | 8.65 | 14.3 \pm 5.7 [6.1 - 23.1] (40%) | 18.3 | 12.6 \pm 4.4 [6.2 - 20.2] (35%) | 16.5 |
| P_{CM-pot} | 4.3 \pm 0.6 [3.7 - 5.2] (13%) | 5.2 | 4.6 \pm 0.9 [3.7 - 6.9] (19%) | 5.7 | 4.8 \pm 0.7 [4.1 - 6.0] (14%) | 4.7 | 5.0 \pm 0.7 [4.5 - 6.6] (14%) | 5.1 |
| P_{CM-kin} | 16.2* \pm 10.4 [2.9 - 29.4] (64%) | 5.3 | 12.4 \pm 7.7 [2.1 - 24.3] (62%) | 4.4 | 10.1 \pm 5.7 [1.6 - 18.7] (56%) | 14.2 | 8.2 \pm 4.5 [1.1 - 15.5] (56%) | 13.3 |

Figure 3 shows that the ME of the non-climber cyclists increased significantly according to the slope ($r = 0.99, p < 0.05$), from 23.1% (slope of 5%) to 37.3% (slope of 11%), while for the WC climber, the ME was not significantly altered by the slope. On the most frequently encountered slopes (5-7%), the ME of the WC climber were significantly higher (115% and 88%) than the ME of the non-climber cyclists. Conversely, on the slopes of 9-11%, the ME of the WC climber cyclists were lower (-22% and -24%) than those of the non-climber cyclists

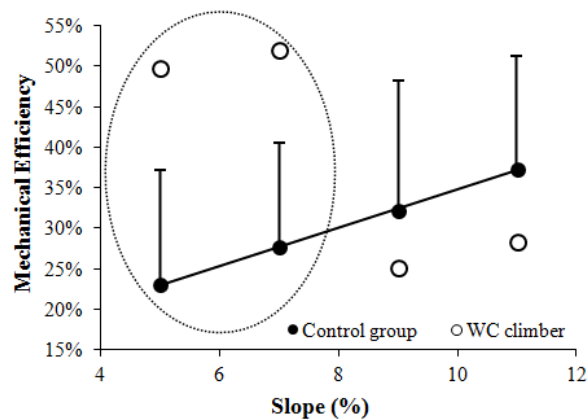


Figure 3: Relationships between the slope and the mechanical efficiency of the non-climber cyclists ($r = 0.99, p < 0.05$) and the WC climber ($r = -0.83, p = 0.16$). The dotted circle shows the ME in the slopes mainly observed in mountain ascents (5-7%)

Figure 4 shows that there was no significant change of ET according to the slope for of all the cyclists. However, the ET of the WC climber was clearly higher on the slopes of 5-7% (+299% and +514%) than the non-climber cyclists'.

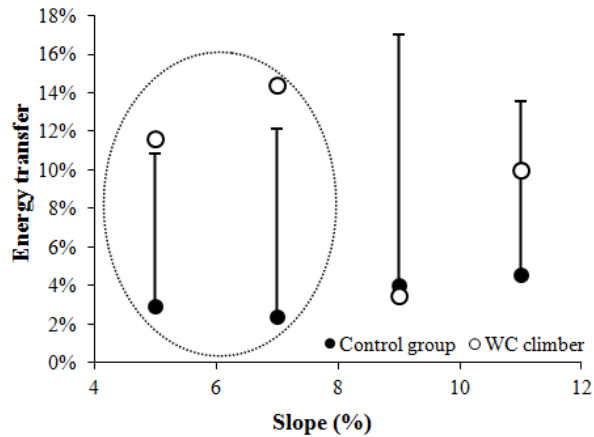


Figure 4: Relationships between the energy transfer index and the slope of the non-climber cyclists ($r = 0.84$, $p = 0.15$) and the WC climber ($r = -0.44$, $p = 0.55$). The dotted circle shows the ET in the slopes mainly observed in mountain ascents (5-7%)

Figure 5 shows that the ME seems to be linked with the ET, with a large difference on the most frequently encountered slopes (5-7%), but the correlations are not significant ($p = 0.15$) for both the WE climber and the non-climber cyclists.

In the group of non-climber cyclists, the RPE significantly increased ($p < 0.01$) according to the slope from 2.8 ± 0.5 to 4.4 ± 1.5 , whereas the P_{CM-ext} decreased. However, for the WC climber, the perceived exertion remained constant (2.5 to 3.0) with an increase of the P_{CM-ext} .

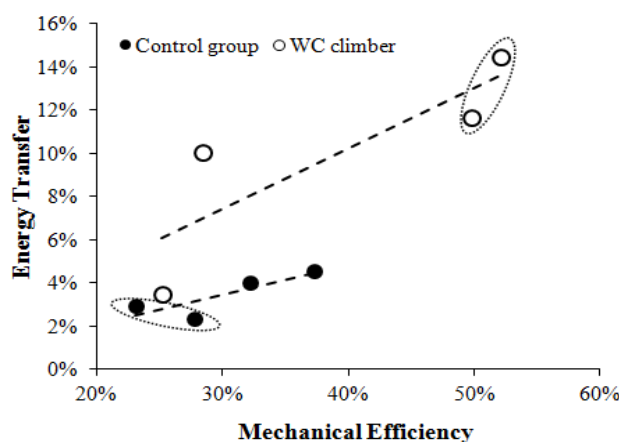


Figure 5: Relationships between the energy transfer index and the mechanical efficiency ($r = 0.84$, $p = 0.15$) for the non-climber cyclists and the WC climber. The dotted circle shows the ET and ME in the slopes mainly observed in mountain ascents (5-7%)

DISCUSSION

This is the first study that measures the P_{CM-ext} in real cycling conditions on a treadmill. The main result of this study clearly shows a higher ME (+100%) and ET (+394%) in the standing position for the WC climber compared to the non-climber cyclists on slopes of mountain ascents encountered most frequently (5-7%).

In a previous study, Millet *et al.* suggested that one cannot rule out that the technical characteristics and the high expertise level of the subjects had an influence on minimizing the energy expenditure when climbing in the standing position (Millet *et al.*, 2002). The large inter-individual differences in biomechanical variables in the standing position for the group of non-climber cyclists show that there were several standing posture techniques used by the cyclists to climb. These differences were observed both in terms of the changes in the potential and kinetic energy levels, and therefore, in the P_{CM-ext} values. These differences could explain the conflicting results reported in the previous studies about the physiological responses between the seated and standing positions (Swain et Wilcox, 1992 ; Tanaka *et al.*, 1996 ; Millet, Tronche, *et al.*, 2002 ; Harnish *et al.*, 2007 ; Fonda et Šarabon, 2012).

The biomechanical adaptations differ between the WC climber and the non-climber cyclists according to the slope of the ascent for the same intensity in the standing position. The ME of all of the cyclists ranged between 23% and 52% (i.e., the effective power output [P_{bike}] represented only 23% to 52% of the P_{CM-ext}). This result shows that in the standing position, the CM movements of the cyclists produce an important amount of external work, which was considerably higher than the effective work measured at the rear wheel hub on the bike.

It is interesting to observe that on the slopes of the most frequently encountered mountain ascents (5-7%), the P_{CM-kin} of the non-climber cyclists essentially represents the major part of the energy provided at the CM compared to the P_{CM-pot} . Surprisingly, in ascents, the kinetic work of the non-climber cyclists was two to four times higher than the potential work, although simple visual observations did not provide any substantial evidence of changes in the cyclist's speed during a pedal revolution. Precise measurements of the instantaneous speed of the rider are required in order to identify changes in speed within the pedaling cycle. This greater change in kinetic energy than in potential energy is an important feature of cycling locomotion on uphill terrain which is directly related to the fact that only the tangential force with respect to crank axis is useful for locomotion when the crank axis is near horizontal. The other positions of the crank are associated with a weak mechanical efficiency (i.e., weak effective propulsive force); the cyclist's velocity changes to a large extent on uphill terrain.

Leirdal and Ettema have shown that the evenness of power generation measured from the dead center (DC) size, defined as the minimal pedal work rate compared with the average work rate through the pedal cycle, is an important trait of energy-saving pedaling (Leirdal et Ettema, 2011). These authors reported that an uneven work rate generation will enhance acceleration and deceleration periods through the crank cycle. Thus, to help the cyclists maintain blood flow to the exercising muscles and decrease local fatigue, the fluctuations in work rate and force during the downstroke may be reduced while maintaining work rate. Therefore, the lower P_{CM-kin} of the WC climber observed in this study on the lowest slopes (5-7%) may improve the DC from a better efficiency in the pedaling cycle.

On the frequently encountered mountain ascents (5-7%), the WC climber had a significantly higher ME (+100%) and ET (+394%) than the non-climber cyclists. However, on the steeper slopes (9-11%), which are less frequent, he had a lower ME (-23%) despite a higher ET (+57%). It seems that there may be a relevant relationship between the ME and ET for all of the cyclists (Figure 5) with a higher slope for the WC climber, suggesting that compared to the non-climber cyclists, the more the ME of the WC climber increases, the higher his ET is. However, this trend requires further investigation to be confirmed. The results show that the WC climber is the most efficient on mountain ascents most commonly encountered (5-7%) with high and optimal cadences.

It appears that the difference between the WC climber and the non-climber cyclists resides in a greater ability to transfer the potential energy into kinetic energy. Moreover, it appears that the ME and ET of the WC climber could be altered on severe slopes which involve a decrease in the cadence. One can conjecture that both the ME and ET would be optimized with optimal cadences (> 80 rpm) on the steeper slopes. To achieve this, a specific gear is required which is not always available.

The present findings suggest that an efficient standing technique would be associated with high ME and ET on slopes of mountain ascents most frequently encountered (5-7%). On higher slopes (9-11%) with low cadences (60-70 rpm), the standing technique of the WC climber appears less efficient due to a decrease in both the ME and ET. In this condition, the increase of the P_{CM-ext} associated with a constant RPE could be due to the phenomenon observed by Hawkins and Hull and by Bini and Diefenthaler who demonstrated the presence of the stretch-shortening cycle in leg extensor muscles during cycling in the seated position (Hull et Hawkins, 1990 ; Bini et Diefenthaler, 2009). This suggests that the WC climber would use a standing technique on steeper ascents which allows for a slight elastic energy

storage-reuse in the muscular chains of the lower limbs. The anthropometrical characteristics of the WC climber, with a short trunk, long arms, slender pelvis and lower limbs, allow him to press down on the pedal by using his total body mass with a righted position and both oscillations of the pelvis and the trunk. Further studies are therefore necessary to test this hypothesis.

CONCLUSION

This study demonstrated that during uphill cycling at a moderate intensity, an efficient standing technique used by the WC climber seems to be associated with a high ME and transfers between potential and kinetic energy levels compared to the group of no-climbers. The results show that compared to the non-climber cyclists, the WC climber has a more efficient standing technique on the slopes of mountain ascents most frequently encountered (5-7%), with high cadences which involve a high ME and ET. Further studies are necessary to link the ME and ET with energy cost and performance in cycling locomotion.

ACKNOWLEDGMENTS

No funding was received for this work (from the National Institutes of Health, the Wellcome Trust, the Howard Hughes Medical Institute, or any others). The authors declare that there are no conflicts of interest. The results of this study do not benefit to any companies or manufacturers.

This study was supported by the FDJ.fr Pro Cycling Team. The authors would like to thank the participating cyclists for their cooperation.

The results of the present study do not constitute endorsement by the American College of Sports Medicine.

REFERENCES

1. Belli A, Avela J, Komi PV. Mechanical energy assessment with different methods during running. *Int J Sports Med.* 1993;14(5):252-6.
2. Belli A, Lacour JR, Komi PV, Candau R, Denis C. Mechanical step variability during treadmill running. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1995;70(6):510-7.
3. Belli A, Rey S, Bonnefoy R, Lacour JR. A simple device for kinematic measurements of human movement. *Ergonomics.* 1992;35(2):177.
4. Bertucci W, Duc S, Villerius V, Pernin JN, Grappe F. Validity and reliability of the PowerTap mobile cycling powermeter when compared with the SRM Device. *Int J Sports Med.* 2005;26(10):868-73.

5. Bini RR, Diefenthaler F. Mechanical work and coordinative pattern of cycling: a literature review. *Kinesiology*. 2009;41(1):25-39.
6. Borg G. Psychophysical scaling with applications in physical work and the perception of exertion. *Scandinavian journal of work, environment & health*. 1990;16 Suppl 1:55-8.
7. Bourdin M, Belli A, Arsac LM, Bosco C, Lacour JR. Effect of vertical loading on energy cost and kinematics of running in trained male subjects. *J Appl Physiol*. 1995;79(6):2078-85.
8. Candau R, Belli A, Millet GY, Georges D, Barbier B, Rouillon JD. Energy cost and running mechanics during a treadmill run to voluntary exhaustion in humans. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 1998;77(6):479-85.
9. Cavagna GA. Force platforms as ergometers. *Journal of Applied Physiology*. 1975;39(1):174-9.
10. Fenn W. Work against the gravity and work due to velocity changes in running. *Am J Physiol*. 1930;93:433-62.
11. Fonda B, Šarabon N. Biomechanics and Energetics of Uphill Cycling: A Review. *Kinesiology*. 2012;44(1):5-17.
12. Gardner AS, Stephens S, Martin DT, Lawton E, Lee H, Jenkins D. Accuracy of SRM and power tap power monitoring systems for bicycling. *Med Sci Sports Exerc*. 2004;36(7):1252-8.
13. Hansen EA, Waldeland H. Seated versus standing position for maximization of performance during intense uphill cycling. *J Sports Sci*. 2008;26(9):977-84.
14. Harnish C, King D, Swensen T. Effect of cycling position on oxygen uptake and preferred cadence in trained cyclists during hill climbing at various power outputs. *Eur J Appl Physiol*. 2007;99(4):387-91.
15. Hull ML, Beard A, Varma H. Goniometric measurement of hip motion in cycling while standing. *J Biomech*. 1990;23(7):687-703.
16. Hull ML, Hawkins DA. Analysis of Muscular Work in Multisegmental Movements: Application to Cycling. In: J Winters, S-Y Woo editors. *Multiple Muscle Systems: Springer New York*; 1990, pp. 621-38.
17. Leirdal S, Ettema G. Pedaling technique and energy cost in cycling. *Med Sci Sports Exerc*. 2011;43(4):701-5.
18. Millet GP, Tronche C, Fuster N, Candau R. Level ground and uphill cycling efficiency in seated and standing positions. *Med Sci Sports Exerc*. 2002;34(10):1645-52.
19. Pfau T, Witte TH, Wilson AM. A method for deriving displacement data during cyclical movement using an inertial sensor. *Journal of Experimental Biology*. 2005;208(13):2503-14.
20. Swain DP, Wilcox JP. Effect of cadence on the economy of uphill cycling. *Medicine and science in sports and exercise*. 1992;24(10):1123-7.
21. Tanaka H, Bassett Jr. DR, Best SK, Baker Jr. KR. Seated Versus Standing Cycling in Competitive Road Cyclists: Uphill Climbing and Maximal Oxygen Uptake. *Canadian Journal of Applied Physiology*. 1996;21(2):149-54.

DISCUSSION

Les études qui ont été conduites dans ce travail de thèse apportent une nouvelle approche méthodologique dans le suivi de l'entraînement en cyclisme à partir de la mesure de la $P_{\text{méca}}$. En effet, à partir d'une part, des connaissances acquises avec les travaux menés depuis le début du XX^{ème} siècle sur la relation entre l'intensité maximale d'un exercice et le temps et d'autre part, des résultats obtenus au cours de nos études, nous sommes en mesure de proposer un certain nombre d'applications pratiques permettant d'optimiser le suivi du cycliste à partir de l'analyse de la relation $P_{\text{méca}}$ – temps. Il convient de rappeler ici que dans le contexte de ce doctorant (CIFRE), une des missions qui m'a été confiée était de mettre en pratique les savoirs théoriques au service de l'amélioration du processus d'entraînement des cyclistes dans un but d'optimisation de la performance globale de l'équipe FDJ.

Le cyclisme est le seul sport où il est possible de mesurer en conditions réelles la $P_{\text{méca}}$. Le fait de pouvoir la mesurer précisément en dehors du laboratoire apporte aux études de terrain une réelle pertinence et crédibilité. En effet, la prise en considération des données obtenues en compétition permet d'apporter de nouvelles connaissances et de mieux appréhender les demandes spécifiques des compétitions de niveau mondial. Chez les athlètes de haut niveau, les facteurs motivationnels sont supérieurs sur le terrain, notamment en compétition, ce qui leur permet de réaliser des efforts d'une intensité maximale nettement supérieure à ce qu'ils seraient capable de produire dans des conditions de laboratoire. De plus, comme expliqué par Sassi *et al.* (2006) et Lamberts *et al.* (2010), les tests maximaux sont généralement perturbateurs et mal acceptés par les athlètes au cours de leur période de préparation, particulièrement lorsqu'ils sont proches des compétitions importantes. Par conséquent, l'analyse de la $P_{\text{méca}}$ en routine à l'entraînement et en compétition est un bon indicateur au quotidien du niveau de performance du cycliste. C'est dans ce contexte que le PPR trouve son intérêt. Comme présenté dans l'étude I, la méthodologie de détermination du PPR correspond à l'établissement de la relation entre les $P_{\text{méca}}$ records et les intervalles de temps équivalents chez le cycliste à partir du suivi longitudinal de la $P_{\text{méca}}$ à l'entraînement et en compétition. Le PPR s'assimile donc comme un outil de quantification du niveau de performance du cycliste.

Le fait que le PPR prenne en considération des efforts allant de 1 sec à plusieurs heures est un atout majeur. Toutefois, il entraîne certaines limites. En effet, il caractérise des efforts

maximaux sur un large échantillon de durées contrairement au concept de P_{crit} qui ne comprend que des efforts allant de quelques minutes à moins d'une heure. Mais pour obtenir un PPR valide et fiable, il est nécessaire que l'athlète soit allé au maximum de ses possibilités sur chacune des durées cibles, ce qui rend le processus de détermination relativement long (au minimum une saison). Cette limite dans la méthodologie a fréquemment été soulevée, c'est pourquoi il convient de bien faire la distinction entre une $P_{méca}$ record et une $P_{méca}$ maximale. Il est établi que le PPR concerne essentiellement les $P_{méca}$ records c'est-à-dire les $P_{méca}$ les plus élevées développées par le cycliste, ce qui n'est pas forcément synonyme de $P_{méca}$ maximale.

Comme montré dans l'étude I, le PPR représente une véritable signature biomécanique du potentiel physique d'un cycliste puisqu'il reflète l'expression de l'ensemble de ses qualités physiques. A partir de la classification des zones d'intensité de l'effort de Jones A. M. *et al.* (2009), Francis *et al.* (2010) et Vogt *et al.* (2006), nous avons défini six zones à partir du PPR caractérisant les qualités spécifiques retrouvées en cyclisme (en ajoutant une zone équivalente à une intensité légère) (figure 30):

- la zone 6 traduit les qualités de force – vitesse, communément appelé explosivité dans le jargon cycliste, sur les efforts maximaux inférieurs à 30 sec. La partie haute de cette zone reflète directement la $P_{méca}$ maximale capable d'être directement produite par la voie anaérobie alactique dont la source provient des phosphagènes. Les $P_{méca}$ records dans cette zone traduisent les qualités de sprinter d'un cycliste.
- la zone 5 correspond à la partie haute de la zone d'intensité sévère et correspond aux $P_{méca}$ records entre la PMA et 30 sec, durée généralement où s'exprime la $P_{méca}$ maximale du métabolisme anaérobie lactique. Elle caractérise les efforts maximaux entre 30 sec et environ 4 – 5 min, équivalent à des montées courtes ou des CLM de type prologue. Cette qualité dépend directement du processus anaérobie de la glycolyse.
- la zone 4, initialement délimitée par les $P_{méca}$ records entre 5 et 20 min, coïncide avec la partie basse de la zone d'intensité sévère. Elle traduit les qualités du potentiel maximal aérobie. La limite haute de cette zone correspond à la PMA. Comme démontré à travers l'étude III, la PMA s'avère en moyenne être plus proche de 4 min que de 5 min. D'autre part, la limite basse de cette zone d'intensité sévère correspond à la P_{crit} comme décrit par Jones A. M. *et al.* (2009), qui est très proche également du

deuxième seuil ventilatoire (Dekerle *et al.*, 2003). Cette limite haute a été fixée à la $P_{méca}$ record sur 20 min. Nous reviendrons sur le concept de la P_{crit} au regard du PPR dans un prochain paragraphe.

- la zone 3, correspondant à une intensité soutenue, s'exprime à travers les $P_{méca}$ records entre 20 et 60 min. Les $P_{méca}$ records dans cette zone sont directement en lien avec les qualités spécifiques des grimpeurs ou des rouleurs selon que les niveaux de $P_{méca}$ sont exprimés en fonction du poids ou de la surface frontale. Ils se caractérisent généralement par des performances maximales sur des montées de cols ou des CLM.
- la zone 2, délimitée par les $P_{méca}$ records entre 1 et 4 h, correspond à une intensité modérée et reflète la qualité des cyclistes à développer des $P_{méca}$ élevées sur de longues durées. L'évaluation de l'indice d'endurance aérobie, comme démontré dans l'étude III, complète l'évaluation de la capacité d'endurance aérobie de l'athlète.
- La zone 1, caractérisant une intensité légère, est délimitée par la $P_{méca}$ record sur 4h et correspond ainsi aux $P_{méca}$ inférieures.

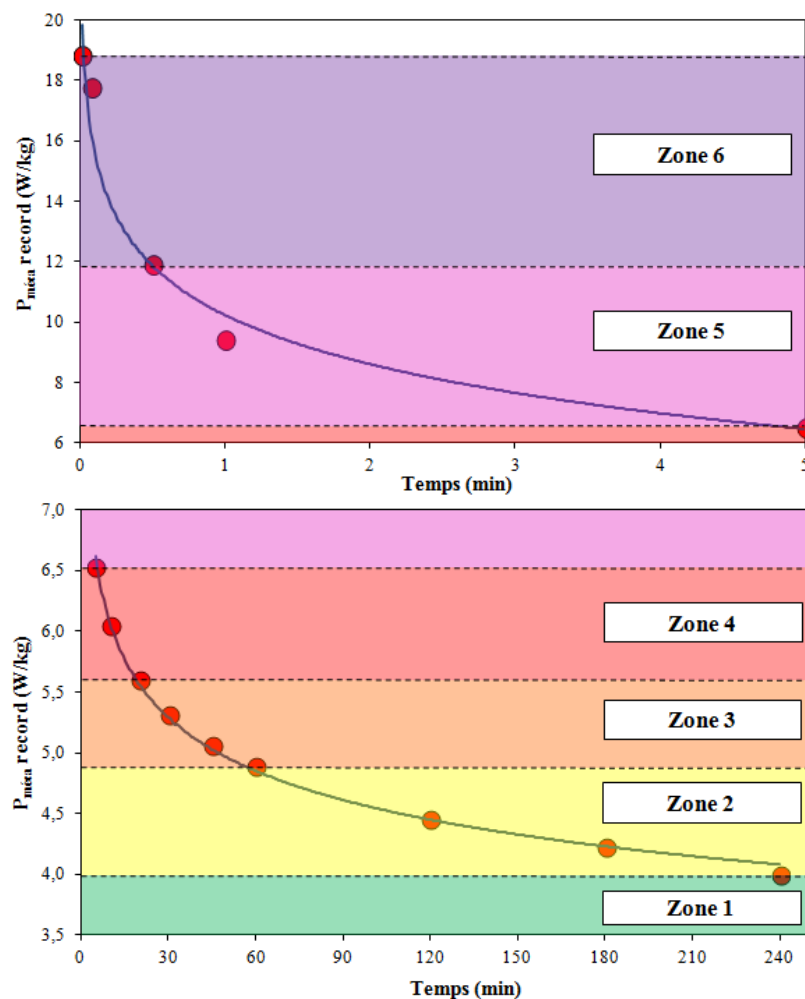


Figure 30 PPR d'un cycliste avec les différentes zones d'intensités délimitées par les $P_{méca}$ records correspondantes

Le PPR permet ainsi d'évaluer le niveau du potentiel physique du cycliste. Il reflète directement le profil de performance en compétition puisque les niveaux de $P_{méca}$ records dans les différentes zones caractérisent les points forts des grimpeurs, rouleurs, puncheurs et sprinters. De ce fait, il se présente comme un outil majeur dans la détection des jeunes talents puisqu'il permet de cibler les qualités physiques de base. Ainsi, dans le processus de détection des jeunes et dans le recrutement, l'équipe FDJ se base désormais à la fois sur les résultats et sur le profil du PPR du cycliste.

L'étude III a montré que le processus de détermination des zones d'intensité pouvait être appréhendé selon une approche différente. En effet, les zones d'intensités, au delà de refléter les différentes qualités physiques spécifiques au cyclisme, sont également utiles dans le processus d'entraînement, notamment dans le calibrage de l'intensités des séances. Le processus pour obtenir un PPR valide étant relativement long, la détermination de la PMA et de T_{PMA} à partir du PPR ne peuvent s'effectuer qu'après une longue période de monitoring. La démarche judicieuse pour déterminer les zones d'entraînement plus rapidement consisterait à se baser sur la $P_{méca}$ moyenne obtenue sur un test maximal 4 min en montée. L'étude III a montré qu'à partir du PPR de 28 cyclistes, le T_{PMA} moyen était proche de 4 min et que les zones d'intensité pouvaient être dans un premier temps définies avec la relation $\%PMA - \log_t$. Ainsi, en évaluant la PMA à partir de la $P_{méca-4min}$, il est possible de définir les 6 zones suivantes :

- Zone 6 : 190 à 320 % PMA
- Zone 5 : 100 à 190 % PMA
- Zone 4 : 85 à 100 % PMA
- Zone 3 : 75 à 85 % PMA
- Zone 2 : 60 à 75 % PMA
- Zone 1 : < 60 % PMA.

Dans un second temps, le suivi de l'évolution des $P_{méca}$ records permet d'affiner et d'ajuster les différentes zones.

De la même manière, le suivi de la progression des $P_{méca}$ records permet d'affiner la détermination de la PMA, de T_{PMA} et de l'indice d'endurance aérobie du cycliste, à partir de la méthodologie présentée dans l'étude III. Partant du même principe de détermination de l'index d'endurance de Peronnet et Thibault en course à pied (Peronnet et Thibault, 1984 ;

Peronnet *et al.*, 1987 ; Tokmakidis *et al.*, 1987), la relation $P_{\text{méca}} \text{ records} - \log_t$ permet d'exprimer le potentiel aérobique du cycliste, ce qui autorise la détermination d'une PMA et d'un T_{PMA} individuel. Cette méthodologie a pour avantages d'être indépendante d'un protocole de test et de prendre en considération des performances maximales de terrain. Il devient ensuite possible de déterminer un indice de la capacité d'endurance aérobique du cycliste à partir de la relation $\%_{\text{PMA}} - \log_t$. Avec le suivi du PPR, l'évaluation du potentiel physique et de ces différents paramètres s'effectuent donc en continu.

Le PPR étant un outil de quantification du niveau de performance, un de ses atouts concerne le suivi de l'évolution du potentiel physique du cycliste dans le temps. Comme le montre l'étude II, le suivi du PPR et des $P_{\text{méca}} \text{ records}$ dans les différentes zones d'intensité autorise la quantification précise de la progression des différentes capacités physiques. L'étude de cas du cycliste de haut niveau, présentée dans l'étude II, apporte un éclairage sur la progression d'un athlète de classe mondiale entre l'adolescence (18 ans) et l'atteinte du plus haut niveau mondial (23 ans) à travers un monitoring de ses performances et paramètres d'entraînement. En effet, le lien entre l'évolution du PPR et celle des indices de la charge d'entraînement, quantifié avec la méthode perceptive de Foster *et al.* (2001), montre un exemple concret de suivi de l'entraînement d'un sportif à partir de méthodes validées scientifiquement.

Toutefois, il convient de bien prendre en considération le fait que les conditions de mesure des $P_{\text{méca}} \text{ records}$ sont dépendantes des conditions dans lesquelles elles ont été réalisées (pacing, drafting, cadence, terrain...). Les études IV et V ont précisément été mises en place afin de mieux comprendre l'influence que peuvent avoir certaines conditions sur la $P_{\text{méca}}$ produite par un cycliste, et de ce fait sur les valeurs du PPR. Comme il l'a été observée, la majorité des $P_{\text{méca}} \text{ records}$ à partir de 30 sec concernent des efforts maximaux réalisés en montée. L'étude IV qui a comparé la $P_{\text{méca}}$ moyenne sur le plat et en montée a montré que pour un effort de même intensité, la $P_{\text{méca}}$ était supérieure en montée de 11% par rapport à celle réalisée sur le plat. Les causes sont multiples mais il est certain que les différences de résistances qui s'opposent à l'avancement contribuent à modifier le couple moteur et la proportion de la $P_{\text{méca}}$ utile à l'avancement du système cycliste - vélo. Etant établi que le profil du terrain a une influence sur la valeur de $P_{\text{méca}}$ lors d'un effort maximal, la nature du terrain doit être prise en considération pour l'étalonnage des zones d'intensité en vue de la programmations des exercices spécifiques.

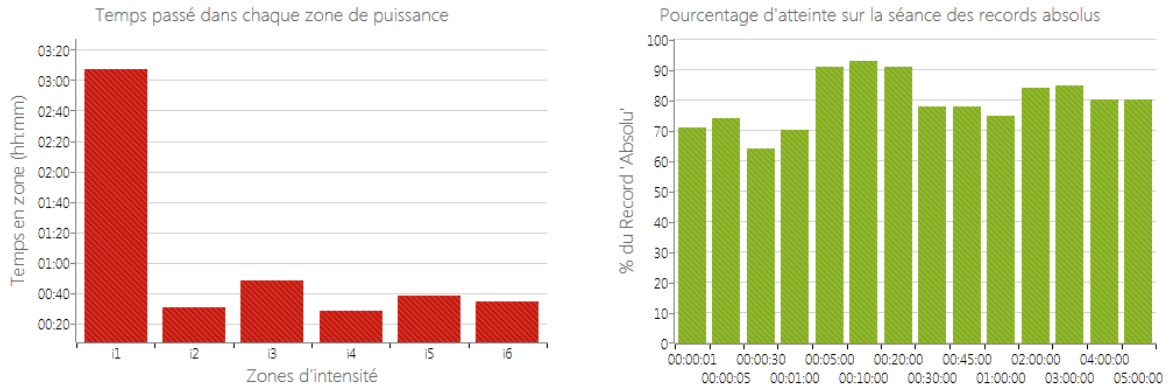
Le fait d'alterner les positions assis et danseuse a certainement un impact sur la production de $P_{méca}$ lors de l'effort en montée. En passant de la position assise à celle en danseuse, le bassin s'élève et s'avance pour ne plus être en appui sur la selle. Cette nouvelle posture modifie l'action de la chaîne musculaire des membres inférieurs et supérieurs et donc la transmission des forces sur les pédales (Li et Caldwell, 1998 ; Duc *et al.*, 2008). Hansen *et al.* (2008) ont montré que la position en danseuse permettait d'améliorer les performances maximales sur des efforts allant jusqu'à 4 min. Comme l'étude V le montre, la position en danseuse est génératrice d'une importante quantité d'énergie au niveau du CM. D'importantes différences interindividuelles de $P_{méca-CM}$ entre les cyclistes ont été observées en danseuse, ce qui sous-entend qu'il existe des techniques très différentes d'un cycliste à l'autre. Certains à l'aise, sont fréquemment en danseuse en montée alors que d'autres, moins à l'aise, roulent plus souvent assis. Ainsi, le grimpeur de classe mondiale de l'étude V est capable d'adopter une technique favorisant les transferts entre l'énergie potentielle et l'énergie cinétique, de manière à optimiser l'efficacité mécanique. Le grimpeur, qui alterne fréquemment les positions assis et danseuse en montée, semble donc tirer profit de la position en danseuse pour améliorer ses performances en montée.

Le PPR et les études menées au cours de ce travail de thèse montrent qu'il est délicat d'utiliser les résultats bruts des tests en laboratoire pour l'entraînement sur le terrain. Comme l'étude IV l'a montré, il existe une différence significative de $P_{méca}$ lors d'un effort réalisé sur un ergomètre ou sur le terrain. La $P_{méca}$ en montée est supérieure (8%) à celle sur ergomètre (IndoorTrainer SRM). Toutefois, elle se rapproche de la $P_{méca}$ sur le plat. Il est important de relever que cette différence est dépendante de l'ergomètre utilisé puisque le système de freinage modifie la biomécanique du pédalage (Bertucci *et al.*, 2007). Par conséquent, la P_{crit} et la $P_{méca}$ reliée à des paramètres physiologiques tels que la $\dot{V}O_{2max}$ ou les seuils ventilatoires, est directement dépendante du protocole et de l'ergomètre utilisé. De plus, la relation $P_{méca}$ records – temps remet également en question le concept de P_{crit} , défini comme une $P_{méca}$ qu'il est possible de soutenir sur une très longue durée. En effet, comme le PPR considère des efforts allant jusqu'à 4 – 5 h, il a permis de montrer que les $P_{méca}$ maximales continuent de décroître au cours du temps. Au final, il apparaît que les concepts et paramètres physiologiques obtenus en laboratoire dans des conditions standardisés n'apportent que très peu d'application sur le terrain. Néanmoins, le suivi de leur évolution dans le temps s'avère être intéressant si les conditions de passation restent identiques pour analyser la progression de l'athlète.

Les applications pratiques issues des différentes études que nous avons conduit ont été nombreuses au sein de l'équipe FDJ depuis 3 ans. Au-delà de l'amélioration de l'évaluation du potentiel physique, l'utilisation du PPR s'est progressivement instaurée comme partie intégrante du processus d'entraînement des cyclistes au quotidien. Une plateforme web a été créée afin de centraliser les informations d'entraînement de l'ensemble des coureurs de l'équipe. Elle a pour but de réaliser 1) le suivi longitudinal des performances maximales de chaque athlète à partir des $P_{méca}$ records, 2) le suivi longitudinal du processus d'entraînement et, 3) la quantification précise des charges d'entraînement. Chaque cycliste possède son compte personnel qu'il met quotidiennement à jour en important les fichiers SRM et en renseignant les indices perceptifs de la séance (CR10, niveaux d'épuisement et de sensations). Ce compte est confidentiel avec un accès réservé uniquement au staff technique (entraîneurs et directeurs sportifs). Ainsi, les données enregistrées par le SRM à l'entraînement et en compétition ($P_{méca}$, fréquence cardiaque, cadence, vitesse, altimétrie, température) sont mises en ligne avant d'être téléchargées puis analysées par les entraîneurs.

Une analyse succincte était réalisée directement sur la plateforme web lors de l'import d'un fichier SRM en calculant (figure 31) :

- les $P_{méca}$ records de la séance sur les différentes durées,
- le pourcentage des $P_{méca}$ records de la séance en fonction des $P_{méca}$ records absolus,
- l'expression du PPR en fonction d'une période défini (par exemple la saison en cours),
- l'expression du PPR en fonction des records absolus.



Choix de la période pour l'analyse des records de puissance : du mercredi 01 janvier 2014 au jeudi 14 août 2014

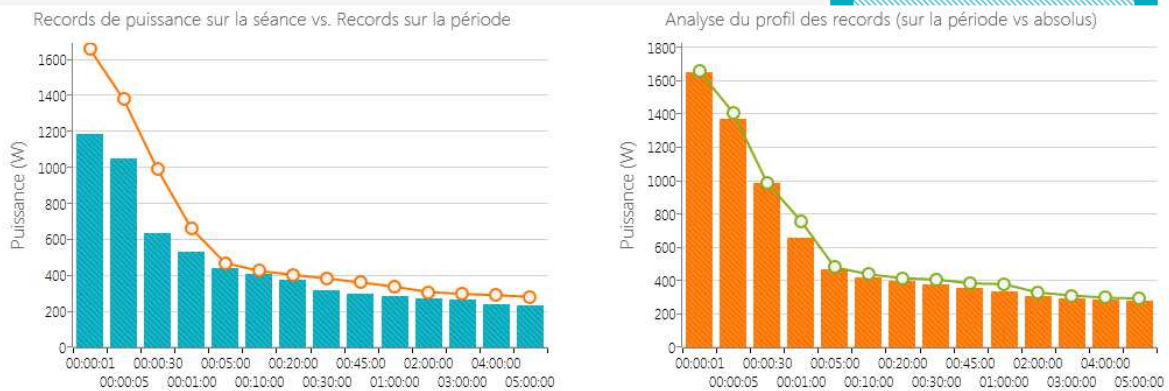


Figure 31 Statistiques d'une séance d'entraînement affichées lors de l'import d'un fichier SRM sur la plateforme web utilisée par les cyclistes de l'équipe FDJ

Avec cette méthode, le cycliste est capable d'interpréter au quotidien la valeur des performances qu'il a réalisé au regard de son potentiel physique maximal. Sur certaines séances nécessitant un engagement mental important, cela peut constituer une source de motivation pour l'athlète. De même, le fait d'améliorer ou de s'approcher d'un record peut être un moyen de mise en confiance à l'approche des objectifs. De leur côté, les entraîneurs actualise un fichier de suivi des $P_{méca}$ de l'ensemble des performances réalisées à l'entraînement et en compétition (figure 32). A partir de ce répertoire, il devient possible d'établir un classement des $P_{méca}$ records sur chacun des différents intervalles de temps et de suivre l'évolution du PPR au fil des années. Evidemment, l'ajustement des zones d'intensité utile à la calibration de l'intensité des séances d'entraînement se réalise au gré de l'amélioration des $P_{méca}$ records.

Au total, ce travail de thèse montre comment la mesure de la $P_{\text{méca}}$ au quotidien accentue le principe d'individualisation du suivi de l'entraînement en cyclisme. Le PPR permet d'affiner la précision dans le processus d'entraînement au niveau de l'évaluation, du monitoring, de la programmation ou encore de la quantification.

Par ailleurs, dans un contexte où le cycliste cherche à se sortir de ses vieux démons et recréabiliser les performances des coureurs, le concept du PPR trouve une certaine légitimité. En effet, il peut permettre aux cyclistes d'exposer l'évolution de leur performances au cours du temps, à l'image du travail mené dans l'étude II. Depuis quelques années, des journalistes, entraîneurs ou scientifiques interprètent dans les médias les $P_{\text{méca}}$ produites par les coureurs dans les ascensions de cols à partir de méthodes indirectes afin de spéculer si la performance des cyclistes est crédible ou suspicieuse. Comme l'étude de Millet *et al.* (2013) le montre, ces estimations peuvent être biaisés par de nombreux facteurs notamment ceux influant sur les résistances aérodynamiques (direction et vitesse du vent, drafting...). La publication du PPR par les athlètes pourrait ainsi permettre de donner du crédit aux performances qu'ils réalisent et d'être transparent sur leur progression, en supposant que les $P_{\text{méca}}$ données soient justes et mesurées par des capteurs bien calibrés. Certains médias et journalistes ont ainsi déjà évoqué l'utilisation du PPR avec cet objectif (figure 33).

Enfin, le concept du PPR pourrait constituer à l'avenir un puissant outil de mesure préventif et de contrôle dans le temps du potentiel physique du sportif dans le cadre de la lutte contre le dopage. Par exemple, il pourrait permettre de mieux cibler les contrôles antidopage en regard de la progression soudaine d'athlète. Ce travail réalisé dans le cadre du cyclisme pourrait donc inspirer d'autres disciplines sportives dans un proche avenir.

CYCLISME

Le capteur de mensonges

La FDJ a lancé l'idée d'utiliser les capteurs de puissance comme un outil supplémentaire dans la lutte antidopage.

PEN BRON - (Loire-Atlantique) de notre envoyé spécial

ET SI LE CAPTEUR de puissance que l'on voit aujourd'hui sur la plupart des vélos de pros devenait une arme de dissuasion massive pour aider le cyclisme à se débarrasser du dopage ? Rien ne pourra bien sûr remplacer les contrôles, mais la technologie de plus en plus sophistiquée qui accompagne aujourd'hui les coureurs pourrait aider les gendarmes à débusquer les tricheurs. Depuis quelques années, Fred Grappe, entraîneur de l'équipe FDJ (1), est devenu un incontournable du capteur de puissance et ne se lasse pas des enseignements qu'il lui apporte (2). « C'est un élément de travail énorme, dit-il. Aujourd'hui, on peut considérer que plus de 50 % des coureurs dans le peloton utilisent ce système. »

Fred Grappes s'en est servi pour élaborer une base de données sur chaque coureur. Complète et complète au fil des mois, des tests et des courses, elle lui a permis de dessiner un profil type, qu'il appelle le Profil puissance record (PPR). Il est un quelque-chose la signature physiologique de l'athlète. « Chaque coureur a son propre profil, explique-t-il. Il faut à peu près six mois de données pour qu'il soit réaliste, mais on peut encore l'affiner avec les années. » Son travail lui a valu une publication dans un journal scientifique américain.

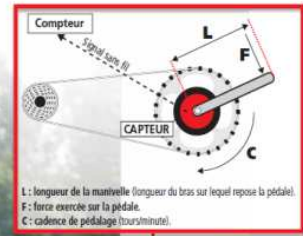
Un complément du passeport biologique

Le capteur de puissance, un SRM (Schoberer Rad Messtechnik) dans l'équipe FDJ, permet de mesurer la puissance développée par un coureur à chaque instant, à l'entraînement comme en course. En rassemblant toutes ces mesures, l'entraîneur recueille un maximum de données fiables sur la puissance développée sur une durée allant d'une seconde à cinq heures. Au fil des mois ou des ans, la courbe peut témoigner des progrès des coureurs. « Mon profil de puissance record, je le regarde tous les jours, explique Jeremy Roy, le coureur de la FDJ. Il me permet de me situer physiquement. » Mais il peut aussi trahir une transgression des règles. De façon simple, si le coureur réalise une performance nettement supérieure à ses records enregistrés, c'est probablement qu'il a triché... « Une variation trop importante d'un profil bien défini pourrait interpeller », dit Fred Grappe de façon plus diplomatique. Il est persuadé que son travail pourrait devenir un allié du passeport biologique, qui fonctionne de la même manière, mais pour les valeurs hématologiques. « Ce genre de test, couplé au passeport biologique, peut devenir un excellent outil de travail pour la lutte antidopage, souligne-t-il. En plus, mis à part le prix du capteur (de 1 000 à 3 500 euros), ce n'est pas cher. Le capteur de puissance est un outil de mesure sensible mais fiable. Il faut juste s'assurer de temps en temps du bon étalonnage du système (donc prévoir des contrôles inopinés des capteurs comme on organise aujourd'hui des contrôles inopinés sanguins ou urinaires). Ensuite, il faudrait croiser les données du passeport biologique avec le Profil puissance record. Malheureusement, aucune étude comparative n'a été faite jusqu'à présent. »

Fred Grappe, tout comme Julien Pinot, frère de Thibaut et auteur d'un mémoire sur une nouvelle méthode d'analyse du potentiel physique du cycliste, reste persuadé qu'il est sur la bonne voie et que si les contrôles sanguins et urinaires sont indispensables, sa méthode pourrait s'imposer en complément. Il y a deux ans, à Lausanne, il a même été invité à débattre avec les scientifiques au moment de la mise en place du passeport biologique. « C'était une rencontre entre universitaires, explique-t-il. Mais c'est bien la preuve que ces chercheurs ont trouvé un certain intérêt à ce travail. » La lutte antidopage y gagnerait en efficacité et le système présenterait aussi l'énorme avantage de responsabiliser davantage les équipes. « Aujourd'hui, avec un tel profil, les managers ne peuvent plus dire qu'ils ne savent pas lorsqu'un de leurs coureurs est pris pour dopage », insiste Fred Grappe. En adoptant un tel système de contrôle, on obligerait aussi les équipes à passer des déclarations de bonnes intentions à la mise en pratique de leurs résolutions. Hier, l'équipe Androni-Venezuela a apporté son soutien à l'initiative de la FDJ. Un nouvel élan ?

MANUEL MARTINEZ
(1) Il est aussi maître de conférences en biomécanique et physiologie de l'exercice musculaire à l'université de Besançon.
(2) Julien Pinot, frère de Thibaut et lui-même entraîneur, prépare une thèse de doctorat sur le PPR.

Le capteur de puissance, comment ça marche ?



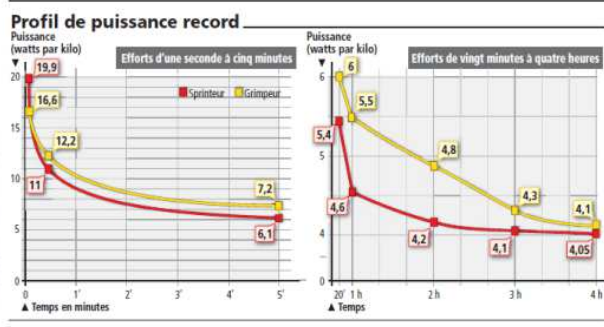
LE CALCUL DE « LA FORCE EFFICACE »

Lorsque le coureur appuie sur ses pédales (à contre-pieds ou à l'envers), la pression exercée déforme le pédalier. Le capteur enregistre cette déformation, calcule ce qu'on peut déduire comme la force efficace du coureur. En fonction de la longueur des manivelles et de la fréquence de pédalage enregistrée (le nombre de tours de pédalier effectué par le coureur), le capteur convertit cette déformation en une puissance exprimée en watts.

Les pros s'en servent à l'entraînement. Ils savent dès lors préparer par leur entraînement qui leur incombent de maintenir un nombre précis de watts pendant une certaine durée sur un certain type de terrain, par exemple. Ils s'en servent également dans les contre-la-montre, notamment pour gérer leur effort et ne pas se mettre trop rapidement dans le rouge. Mais ils utilisent aussi le capteur de puissance dans des situations de course. Lors du dernier Tour de France, Bradley Wiggins a expliqué que, s'il n'avait pas accélééré pour répondre aux attaques de Vincenzo Nibali dans les cols, c'est parce que son capteur lui indiquait qu'il évoluait déjà à un niveau de puissance très élevé et qu'il savait donc que l'Italien ne pouvait pas maintenir cet effort très longtemps. Donc le capteur peut aussi avoir des repercussions tactiques sur la course.

L'AMA cherche un outil universel

L'AGENCE MONDIALE antidopage (AMA) pourrait-elle intégrer les données individuelles récoltées par le biais d'un indicateur de performance et les consigner dans le passeport des athlètes afin de surveiller la trajectoire de leurs performances ? « Sur le principe, oui », selon l'un des porte-parole de l'agence, qui s'intéresse depuis toujours à cette problématique. « L'utilisation d'indicateurs de performance tels que les capteurs de puissance ont déjà fait l'objet de discussions à l'AMA, dans le cadre de réflexions plus larges sur les profils de performances des sportifs. Les données quantitatives brutes peuvent être utiles dans l'identification de possibles dérives dénotantes, et des variations inexpliquées ou inopinées de la performance pourraient être prises en compte pour cibler certains sportifs dans le cadre de contrôles inopinés dits intelligents. » Cette information supplémentaire pourrait potentiellement faire partie du processus d'évaluation dans le cadre du passeport biologique de l'athlète (PBA), mais, selon nous, la pertinence de ce capteur de puissance est actuellement limitée à un nombre trop restreint de sports. Bien que l'AMA continue d'investiguer dans ce domaine, elle ne prévoit donc pas d'intégrer de statistiques sur les performances au PBA dans un futur proche. — D. R.



VOICI LES PPR DE DEUX COUREURS de la FDJ aux profils différents. Chaque point montre les records de puissance atteints par ces coureurs lors d'efforts allant d'une seconde (puissance maximale développée) à quatre heures. Le premier coureur (courbe rouge) est un sprinteur, le second (courbe jaune), un grimpeur. Le premier tableau montre le calcul de ce profil sur des efforts allant d'une seconde à cinq minutes. Le second, sur des efforts allant de vingt minutes à quatre heures. Le sprinteur, au physique plus massif, plus musclé, est aussi plus explosif. Sa puissance maximale (atteinte sur une seconde) est bien plus élevée (19,9 watts par kilo contre 16,6 « seulement » pour le grimpeur). Mais, dès que l'effort atteint les trente secondes, la courbe du grimpeur passe au-dessus de celle du sprinteur. Au bout de quatre heures, en revanche, on se situe dans les efforts d'endurance et les courbes se rapprochent. « C'est un peu comme si on mesurait les performances d'un athlète sur un 100 m, un 400 m, un 1 500 m, un 10 000 m et jusqu'au marathon », explique Fred Grappe. Le dépassement en course de ces valeurs records constituerait une alerte pour les autorités antidopage. « C'est surtout sur des efforts compris entre cinq minutes et une heure que ce serait révélateur », ajoute Fred Grappe. Autrement dit, on pourrait désormais siffler les excès de vitesse sur des efforts de cette durée, comme un contre-la-montre ou une ascension de col... Références : Fred Grappe, Puissance et performance en cyclisme, éditions De Boeck, 2012.

Figure 33 Article du journal L'Equipe du 14 décembre 2012 sur l'intérêt du PPR

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Les études conduites au cours de ce travail de thèse ont montré que la $P_{\text{méca}}$ était une variable centrale dans le processus d'optimisation de la performance en cyclisme. Nos recherches ont porté sur deux axes principaux d'analyse de la performance : 1) l'évaluation et le monitoring du potentiel physique avec pour but l'amélioration du suivi de l'entraînement et 2) l'optimisation de l'interface homme – machine à partir du développement de nouveaux composants matériels et équipements. L'ensemble des résultats obtenus montre que la capacité de performance du cycliste peut être évaluée à partir de la mesure de la $P_{\text{méca}}$ en analysant :

- ses différentes qualités physiques, exprimées par le PPR à partir de la relation $P_{\text{méca}}$ record – temps ;
- sa progression longitudinale (à travers les années) quantifiée à partir de l'évolution du PPR en réponse au processus de suivi de l'entraînement ;
- les conditions de locomotion (plat, montée, laboratoire) qui ont une influence directe sur le niveau de $P_{\text{méca}}$ produit ;
- la technique utilisée lors de l'exercice en danseuse à travers les transferts d'énergie qui ont lieu au niveau du centre de masse ;
- le matériel utilisé qui est directement en lien avec le niveau des résistances qui s'opposent à l'avancement.

L'analyse de la $P_{\text{méca}}$ à l'intersection de ces différentes sphères liées à la performance a permis d'optimiser de manière rationnelle le niveau de performance d'ensemble des cyclistes de l'équipe FDJ.

Ce travail de thèse est novateur dans le domaine de l'optimisation de la performance sportive puisqu'il a été entièrement conduit au sein d'une équipe cycliste professionnelle à la faveur de la création d'un département R&D au sein de l'équipe. Lors de ces trois années, l'ensemble du staff technique et des coureurs a complètement adhéré aux activités conduites par ce département. Pour preuve, les résultats obtenus au fil des trois saisons par les cyclistes de l'équipe FDJ ont été en constante progression en reflétant la nouvelle dimension de l'équipe acquise sur le plan international avec des jeunes leaders talentueux. Il paraît donc aujourd'hui indispensable de poursuivre le travail entrepris au cours de cette thèse, notamment dans un contexte compétitif avec une concurrence accrue et perpétuelle entre les équipes World Tour. Les apprentissages tirés de chacune des études qui ont été conduites, même s'ils n'ont pas

toujours aboutis à des résultats positifs, nous ont permis d'améliorer de manière significative nos connaissances et notre approche expérimentale, notamment dans l'évaluation de la traînée aérodynamique. Le travail sur l'amélioration du matériel et des équipements, en relation avec les partenaires, devra être poursuivi. Au-delà des aspects aérodynamiques, nos recherches vont également être conduites sur d'autres paramètres comme : la résistance au roulement (pneumatiques), la rigidité (cadres et roues), le pilotage (pneumatiques, cadres et roues), le confort (cadres, roues et pneumatiques) ou encore les frictions mécaniques (lubrifiant et roulements). Les prochaines études devront offrir la possibilité de choisir les meilleurs compromis en terme de matériels et d'équipements en fonction des conditions de pratiques rencontrées par les cyclistes de l'équipe FDJ. Enfin, les recherches qui ont été portées sur l'évaluation du potentiel physique et sur l'analyse de la technique en danseuse seront également approfondies car nous savons pertinemment que certains mécanismes sous-jacents doivent être encore étudiés.

Le but ultime fixé par l'équipe FDJ pour les prochaines années est d'améliorer la capacité de performance de l'ensemble de ses coureurs et de ses leaders en continuant à travailler d'arrache pieds sur l'interface entre le cycliste et sa machine en mettant en complète relation les sphères scientifique et pratiques et en accentuant le développement de chacune d'elles.

BIBLIOGRAPHIE

- Allen, H., & Coggan, A. R. (2010). *Training and Racing with a Power Meter*. Boulder, Colorado: VeloPress.
- Astrand, P. O., & Rodahl, K. (1970). *Textbook of work physiology*. New York: McGraw Hill.
- Avalos, M., Hellard, P., & Chatard, J.-C. (2003). Modeling the training-performance relationship using a mixed model in elite swimmers. *Medicine and science in sports and exercise*, 35(5), 838-846.
- Balmer, J., Davison, R. C., & Bird, S. R. (2000). Peak power predicts performance power during an outdoor 16.1-km cycling time trial. *Med Sci Sports Exerc*, 32(8), 1485-1490.
- Banister, E. W., & Hamilton, C. L. (1985). Variations in iron status with fatigue modelled from training in female distance runners. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 54(1), 16-23.
- Baron, B., Moullan, F., Deruelle, F., & Noakes, T. D. (2011). The role of emotions on pacing strategies and performance in middle and long duration sport events. *Br J Sports Med*, 45(6), 511-517. doi: 10.1136/bjism.2009.059964
- Belli, A., Avela, J., & Komi, P. V. (1993). Mechanical energy assessment with different methods during running. *Int J Sports Med*, 14(5), 252-256. doi: 10.1055/s-2007-1021173
- Belli, A., Lacour, J. R., Komi, P. V., Candau, R., & Denis, C. (1995). Mechanical step variability during treadmill running. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 70(6), 510-517.
- Belli, A., Rey, S., Bonnefoy, R., & Lacour, J. R. (1992). A simple device for kinematic measurements of human movement. *Ergonomics*, 35(2), 177.
- Bentley, D. J., McNaughton, L. R., Thompson, D., Vleck, V. E., & Batterham, A. M. (2001). Peak power output, the lactate threshold, and time trial performance in cyclists. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 33(12), 2077-2081.
- 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. *Appl Physiol Nutr Metab*, 38(1), 7-13. doi: 10.1139/apnm-2012-0216
- 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. doi: 10.1080/02640414.2012.738925
- Bertucci, W., Betik, A., Duc, S., & Grappe, F. (2012). Gross efficiency and cycling economy are higher in the field as compared with on an Axiom stationary ergometer. *J Appl Biomech*, 28(6), 636-644.

- Bertucci, W., Duc, S., Villerius, V., & Grappe, F. (2005). Validity and reliability of the Axiom PowerTrain cycle ergometer when compared with an SRM powermeter. *Int J Sports Med*, 26(1), 59-65. doi: 10.1055/s-2004-817855
- 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. *Int J Sports Med*, 26(10), 868-873. doi: 10.1055/s-2005-837463
- Bertucci, W., Grappe, F., & Gros Lambert, A. (2007). Laboratory versus outdoor cycling conditions: differences in pedaling biomechanics. *J Appl Biomech*, 23(2), 87-92.
- Billat, V. (2001). L'apport de la science dans l'entraînement sportif: l'exemple de la course de fond. *STAPS*(1), 23-43.
- Billat, V. (2003). *Physiologie et méthodologie de l'entraînement: De la théorie à la pratique: De Boeck Supérieur*.
- Billat, V., Faina, M., Sardella, F., Marini, C., Fanton, F., Lupo, S., . . . Dalmonte, A. (1996). A comparison of time to exhaustion at VO₂ max in elite cyclists, kayak paddlers, swimmers and runners. *Ergonomics*, 39(2), 267-277. doi: 10.1080/00140139608964457
- Billat, V., & Koralsztein, J. P. (1996). Significance of the velocity at VO₂max and time to exhaustion at this velocity. *Sports Med*, 22(2), 90-108.
- Billat, V., Renoux, J. C., Pinoteau, J., Petit, B., & Koralsztein, J. P. (1994). Times to exhaustion at 100% of velocity at VO₂max and modelling of the time-limit/velocity relationship in elite long-distance runners. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 69(3), 271-273.
- Bini, R. R., & Diefenthaler, F. (2009). Mechanical work and coordinative pattern of cycling: a literature review. *Kinesiology*, 41(1), 25-39.
- 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. doi: 10.1080/17461391.2013.810306
- Bocquet, V., & Billat, V. (1999). Modèles mathématiques et physiologiques de la performance humaine. *Science & Sports*, 14(6), 278-291. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0765-1597\(00\)86522-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0765-1597(00)86522-3)
- Borg, G. (1990). Psychophysical scaling with applications in physical work and the perception of exertion. *Scand J Work Environ Health*, 16 Suppl 1, 55-58.
- Bosquet, L., Leger, L., & Legros, P. (2002). Methods to determine aerobic endurance. *Sports Medicine*, 32(11), 675-700.
- Bourdin, M., Belli, A., Arsac, L. M., Bosco, C., & Lacour, J. R. (1995). Effect of vertical loading on energy cost and kinematics of running in trained male subjects. *J Appl Physiol*, 79(6), 2078-2085.
- Brooks, G. A., & Mercier, J. (1994). Balance of carbohydrate and lipid utilization during exercise: the "crossover" concept. *J Appl Physiol* (1985), 76(6), 2253-2261.
- 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. doi: 10.1249/01.mss.0000232024.06114.a6

- Busso, T., & Chatagnon, M. (2008). Extension du modèle puissance–temps limite pour estimer la production d'énergie aérobie et anaérobie lors de l'exercice intense. *Science & Sports*, 23(5), 239-243. doi: 10.1016/j.scispo.2007.06.009
- Caldwell, G. E., Li, L., McCole, S. D., & Hagberg, J. M. (1998). Pedal and Crank Kinetics in Uphill Cycling. *J Appl Biomech*, 14, 245-259.
- Candau, R., Belli, A., Millet, G. Y., Georges, D., Barbier, B., & Rouillon, J. D. (1998). Energy cost and running mechanics during a treadmill run to voluntary exhaustion in humans. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 77(6), 479-485. doi: 10.1007/s004210050363
- Cavagna, G. A. (1975). Force platforms as ergometers. *Journal of Applied Physiology*, 39(1), 174-179.
- Cazorla. (2001). *Tests de terrain pour évaluer l'aptitude aérobie et utilisation de leurs resultats dans l'entraînement*. Faculté des Sciences du Sport et de l'Education Physique, Université Victor Segalen Bordeaux 2. Bordeaux.
- 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. doi: 10.1249/MSS.0b013e31823ea28a
- Chidnok, W., Fulford, J., Bailey, S. J., Dimenna, F. J., Skiba, P. F., Vanhatalo, A., & Jones, A. M. (2013). Muscle metabolic determinants of exercise tolerance following exhaustion: relationship to the "critical power". *J Appl Physiol (1985)*, 115(2), 243-250. doi: 10.1152/jappphysiol.00334.2013
- Clarke, D. C., & Skiba, P. F. (2013). Rationale and resources for teaching the mathematical modeling of athletic training and performance. *Adv Physiol Educ*, 37(2), 134-152. doi: 10.1152/advan.00078.2011
- Costill, D., & Fox, E. (1969). Energetics of marathon running. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 1(2), 81-86.
- Coyle, E. F. (2005). Improved muscular efficiency displayed as Tour de France champion matures. *Journal of Applied Physiology*, 98(6), 2191-2196. doi: 10.1152/jappphysiol.00216.2005
- Coyle, E. F., Feltner, M. E., Kautz, S. A., Hamilton, M. T., Montain, S. J., Baylor, A. M., . . . Petrek, G. W. (1991). Physiological and biomechanical factors associated with elite endurance cycling performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 23(1), 93-107.
- 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.
- Di Prampero, P. E., Atchou, G., Brückner, J.-C., & Moia, C. (1986). The energetics of endurance running. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 55(3), 259-266.
- Di Prampero, P. E., Cortili, G., Mognoni, P., & Saibene, F. (1979). Equation of motion of a cyclist. *Journal of Applied Physiology*, 47(1), 201-206.
- Duc, S., Bertucci, W., Pernin, J. N., & Grappe, F. (2008). Muscular activity during uphill cycling: effect of slope, posture, hand grip position and constrained bicycle lateral sways. *J Electromyogr Kinesiol*, 18(1), 116-127. doi: 10.1016/j.jelekin.2006.09.007

- Duc, S., Villerius, V., Bertucci, W., & Grappe, F. (2007). Validity and reproducibility of the ErgomoPro power meter compared with the SRM and Powertap power meters. *Int J Sports Physiol Perform*, 2(3), 270-281.
- 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. *J Strength Cond Res*, 19(2), 344-348. doi: 10.1519/R-15714.1
- Ebert, T. R., Martin, D. T., McDonald, W., Victor, J., Plummer, J., & Withers, R. T. (2005). Power output during women's World Cup road cycle racing. *Eur J Appl Physiol*, 95(5-6), 529-536. doi: 10.1007/s00421-005-0039-y
- Ebert, T. R., Martin, D. T., Stephens, B., & Withers, R. T. (2006). Power output during a professional men's road-cycling tour. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 1(4), 324-335.
- Emanuele, U., & Denoth, J. (2012). Influence of road incline and body position on power-cadence relationship in endurance cycling. *Eur J Appl Physiol*, 112(7), 2433-2441. doi: 10.1007/s00421-011-2213-8
- Ettema, G., & Loras, H. W. (2009). Efficiency in cycling: a review. *Eur J Appl Physiol*, 106(1), 1-14.
- Ettema, J. (1966). Limits of human performance and energy-production. *Internationale Zeitschrift für angewandte Physiologie einschließlich Arbeitsphysiologie*, 22(1), 45-54.
- Faina, M., Billat, V., Squadrone, R., De Angelis, M., Koralsztein, J. P., & Dal Monte, A. (1997). Anaerobic contribution to the time to exhaustion at the minimal exercise intensity at which maximal oxygen uptake occurs in elite cyclists, kayakers and swimmers. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 76(1), 13-20.
- Faria, E. W., Parker, D. L., & Faria, I. E. (2005). The science of cycling: physiology and training - part 1. *Sports Med*, 35(4), 285-312.
- Fenn, W. (1930). Work against the gravity and work due to velocity changes in running. *Am J Physiol*, 93, 433-462.
- 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 Appl Physiol (1985)*, 108(4), 866-874. doi: 10.1152/jappphysiol.91425.2008
- Fonda, B., & Šarabon, N. (2012). Biomechanics and Energetics of Uphill Cycling: A Review. *Kinesiology*, 44(1), 5-17.
- Foster, C. (1998). Monitoring training in athletes with reference to overtraining syndrome. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 30(7), 1164-1168.
- Foster, C., Florhaug, J. A., Franklin, J., Gottschall, L., Hrovatin, L. A., Parker, S., . . . Dodge, C. (2001). A new approach to monitoring exercise training. *J Strength Cond Res*, 15(1), 109-115.
- Francis. (1943). *Running records* (Vol. 98). Washington DC: Science Wash.
- Francis, J. T., Quinn, T. J., Amann, M., & LaRoche, D. P. (2010). Defining intensity domains from the end power of a 3-min all-out cycling test. *Med Sci Sports Exerc*, 42(9), 1769-1775. doi: 10.1249/MSS.0b013e3181d612e8

- Frederick, E. C. (1977). A statistical model of endurance in running. *Can J Appl Sport Sci*, 2, 127-132.
- Frederick, E. C. (1986). In search of the asymptote: Projecting the limits of human performance. *IJSB*, 2, 1-5.
- Fregly, B. J., Zajac, F. E., & Dairaghi, C. A. (1996). Crank inertial load has little effect on steady-state pedaling coordination. *J Biomech*, 29(12), 1559-1567.
- Gardner, A. S., Stephens, S., Martin, D. T., Lawton, E., Lee, H., & Jenkins, D. (2004). Accuracy of SRM and power tap power monitoring systems for bicycling. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 36(7), 1252-1258.
- Gimenez, M., Servera, E., & Salinas, W. (1982). Square-Wave Endurance Exercise Test (SWEET) for training and assessment in trained and untrained subjects. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 49(3), 359-368.
- Gonzalez-Haro, C., Galilea, P. A., Drobnic, F., & Escanero, J. F. (2007). Validation of a field test to determine the maximal aerobic power in triathletes and endurance cyclists. *Br J Sports Med*, 41(3), 174-179. doi: 10.1136/bjism.2006.031310
- 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.
- Große-Lordemann, H., & Müller, E. A. (1936). Der Einfluß der Leistung und der Arbeitsgeschwindigkeit auf das Arbeitsmaximum und den Wirkungsgrad beim Radfahren. *Arbeitsphysiologie*, 9(4), 454-475. doi: 10.1007/bf02009953
- Hansen, E. A., Jorgensen, L. V., Jensen, K., Fregly, B. J., & Sjogaard, G. (2002). Crank inertial load affects freely chosen pedal rate during cycling. *J Biomech*, 35(2), 277-285.
- Hansen, E. A., Jorgensen, L. V., & Sjogaard, G. (2004). A physiological counterpoint to mechanistic estimates of "internal power" during cycling at different pedal rates. *Eur J Appl Physiol*, 91(4), 435-442. doi: 10.1007/s00421-003-0997-x
- Hansen, E. A., & Waldeland, H. (2008). Seated versus standing position for maximization of performance during intense uphill cycling. *J Sports Sci*, 26(9), 977-984. doi: 10.1080/02640410801910277
- Harman, E., Knuttgen, H., Frykman, P., & Patton, J. (1987). Exercise endurance time as a function of percent maximal power production. *Medicine and science in sports and exercise*, 19(5), 480.
- Harnish, C., King, D., & Swensen, T. (2007). Effect of cycling position on oxygen uptake and preferred cadence in trained cyclists during hill climbing at various power outputs. *Eur J Appl Physiol*, 99(4), 387-391. doi: 10.1007/s00421-006-0358-7
- Hawley, J. A., & Noakes, T. D. (1992). Peak power output predicts maximal oxygen uptake and performance time in trained cyclists. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 65(1), 79-83.
- Hellard, P., Avalos, M., Lacoste, L., Barale, F., Chatard, J. C., & Millet, G. P. (2006). Assessing the limitations of the Banister model in monitoring training. *J Sports Sci*, 24(5), 509-520. doi: 10.1080/02640410500244697

- Hellard, P., Avalos, M., Millet, G., Lacoste, L., Barale, F., & Chatard, J. C. (2005). Modeling the residual effects and threshold saturation of training: a case study of Olympic swimmers. *J Strength Cond Res*, 19(1), 67-75. doi: 10.1519/14853.1
- Henry, F. M. (1954). Time-velocity equations and oxygen requirements of "all-out" and "steady-pace" running. *Research Quarterly. American Association for Health, Physical Education and Recreation*, 25(2), 164-177.
- 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.
- Hettinga, F. J., De Koning, J. J., Meijer, E., Teunissen, L., & Foster, C. (2007). Biodynamics. Effect of pacing strategy on energy expenditure during a 1500-m cycling time trial. *Med Sci Sports Exerc*, 39(12), 2212-2218. doi: 10.1249/mss.0b013e318156e8d4
- Hill, A. (1927). *Muscular movement in man: the factors governing speed & recovery from fatigue*: McGraw-Hill.
- Hopkins, W. G., Hawley, J. A., & Burke, L. M. (1999). Design and analysis of research on sport performance enhancement. *Med Sci Sports Exerc*, 31(3), 472-485.
- Howald, H., & Poortmans, J. R. (1975). *Metabolic adaptations to prolonged physical exercise*. Basel: Birkhäuser Verlag.
- Hull, M. L., Beard, A., & Varma, H. (1990). Goniometric measurement of hip motion in cycling while standing. *J Biomech*, 23(7), 687-703.
- Hull, M. L., & Hawkins, D. A. (1990). Analysis of Muscular Work in Multisegmental Movements: Application to Cycling. In J. Winters & S.-Y. Woo (Eds.), *Multiple Muscle Systems* (pp. 621-638): Springer New York.
- J. Hopker, S. M., S. A. Jobson, W. Bruce, L. Passfield. (2010). Validity and Reliability of the Wattbike Cycle Ergometer. *Int J Sports Med*.
- 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. (2006). The physiology of the world record holder for the women's marathon. *International Journal of Sports Science and Coaching*, 1(2), 101-116.
- Jones, A. M., Vanhatalo, A., Burnley, M., Morton, R. H., & Poole, D. C. (2009). Critical power: implications for determination of V O₂max and exercise tolerance. *Med Sci Sports Exerc*, 42(10), 1876-1890.
- 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. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*, 294(2), R585-593. doi: 10.1152/ajpregu.00731.2007
- Jones, S., & Passfield, L. (1998). The dynamic calibration of bicycle power measuring cranks. *The Engineering of Sport*, 265-274.
- Karsten, B., Jobson, S. A., Hopker, J., Jimenez, A., & Beedie, C. (2014). High agreement between laboratory and field estimates of critical power in cycling. *Int J Sports Med*, 35(4), 298-303. doi: 10.1055/s-0033-1349844
- 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. doi: 10.1055/s-0033-1349093

- 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.
- Kyle, C., & Burke, E. (1984). Improving the racing bicycle. *Mechanical engineering*, 106(9), 34-45.
- Lacour, J. R., & Flandrois, R. (1977). Role of aerobic metabolism in prolonged intensive exercise. *J Physiol*, 73(2), 89-130.
- Lacour, J. R., Messonnier, L., & Bourdin, M. (2009). Physiological correlates of performance. Case study of a world-class rower. *European Journal of Applied Physiology*, 106(3), 407-413. doi: 10.1007/s00421-009-1028-3
- Lamberts, R. P., Rietjens, G. J., Tjink, H. H., Noakes, T. D., & Lambert, M. I. (2010). Measuring submaximal performance parameters to monitor fatigue and predict cycling performance: a case study of a world-class cyclo-cross cyclist. *European Journal of Applied Physiology*, 108(1), 183-190. doi: 10.1007/s00421-009-1291-3
- Larrazabal, Iriberri, & Muriel. (2006). *Power output related to exposure time in professional road Cycling*. Paper presented at the Endurance Sports Science Conference, Birmingham.
- Lawton, E., Martin, D., & Lee, H. (1999). *Validation of SRM power cranks using dynamic calibration*. Paper presented at the Fifth IOC World Congress.
- Léger, L., Mercier, D., & Gauvin, L. (1986). The relationship between % VO₂max and running performance time. In L. DM (Ed.), *The 1984 Olympic Scientific Congress proceedings. Sport and Elite performers* (Vol. 3, pp. 113-120). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Leirdal, S., & Ettema, G. (2011). Pedaling technique and energy cost in cycling. *Med Sci Sports Exerc*, 43(4), 701-705. doi: 10.1249/MSS.0b013e3181f6b7ea
- Li, L., & Caldwell, G. E. (1998). Muscle coordination in cycling: effect of surface incline and posture. *J Appl Physiol*, 85(3), 927-934.
- Lietzke, M. (1954). An analytical study of world and Olympic racing records. *Science*, 119(3089), 333-336.
- Margaria, R., & Margaria, R. (1976). *Biomechanics and energetics of muscular exercise*: Clarendon Press Oxford.
- Martin, J., Milliken, D. L., Cobb, J. E., McFadden, K. L., & Coggan, A. R. (1998). Validation of a mathematical model for road cycling power. *Journal of applied biomechanics*, 14, 276-291.
- Meade. (1916). An analytical study of athletic records. *Sci Monthly*, 2, 596-600.
- Meade, G. P., & Lietzke, M. (1956). Consistent running records. *Science*, 124, 1025.
- Menaspà, P., Quod, M., Martin, D. T., Victor, J., & Abbiss, C. R. (2013). Physiological demands of road sprinting in professional and U23 cycling. A pilot study. *Journal of Science and Cycling*, 2(2).
- Mercier, D., Léger, L., & Desjardins, M. (1984). Nomogramme pour prédire la performance, le VO₂max et l'endurance relative en course de fond. *Méd Sport*, 58, 181-187.
- Messonier, L., Bourdin, M., & Lacour, J. R. (1998). Influence of age on different determining factors of performance on rowing ergometer. *Science and Sports*, 13(6), 293-294. doi: 10.1016/s0765-1597(99)80011-2

- Mikulic, P. (2011). Maturation to elite status: a six-year physiological case study of a world champion rowing crew. *European Journal of Applied Physiology*, *111*(9), 2363-2368. doi: 10.1007/s00421-011-1870-y
- Millet, G. P., Candau, R., Barbier, B., Busso, T., Rouillon, J. D., & Chatard, J. C. (2002). Modelling the transfers of training effects on performance in elite triathletes. *Int J Sports Med*, *23*(1), 55-63. doi: 10.1055/s-2002-19276
- Millet, G. P., Tronche, C., Fuster, N., & Candau, R. (2002). Level ground and uphill cycling efficiency in seated and standing positions. *Med Sci Sports Exerc*, *34*(10), 1645-1652. doi: 10.1249/01.MSS.0000031482.14781.D7
- Millet, G. P., Tronche, C., & Grappe, F. (2013). Accuracy of Indirect Estimation of Power Output From Uphill Performance in Cycling. *International Journal of Sports Physiology and Performance*.
- Minetti, A. E. (2011). Bioenergetics and biomechanics of cycling: the role of 'internal work'. *Eur J Appl Physiol*, *111*(3), 323-329. doi: 10.1007/s00421-010-1434-6
- Monod, H., & Scherrer, J. (1965). The work capacity of a synergic muscular group. *Ergonomics*, *8*(3), 329-338.
- Montmayer, A., & Villaret, M. (1990). Etude de la vitesse maximale aérobie derriere cycliste. *Sci Motricité*, *10*, 27-31.
- 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.
- Morton, R. H. (1986). A three component model of human bioenergetics. *J Math Biol*, *24*(4), 451-466.
- Morton, R. H. (1990). Modelling human power and endurance. *J Math Biol*, *28*(1), 49-64.
- Morton, R. H. (2006). The critical power and related whole-body bioenergetic models. *Eur J Appl Physiol*, *96*(4), 339-354.
- Morton, R. H., & Hodgson, D. J. (1996). The relationship between power output and endurance: a brief review. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, *73*(6), 491-502.
- Mujika, I., Busso, T., Lacoste, L., Barale, F., Geysant, A., & Chatard, J. C. (1996). Modeled responses to training and taper in competitive swimmers. *Med Sci Sports Exerc*, *28*(2), 251-258.
- Murgatroyd, S. R., Ferguson, C., Ward, S. A., Whipp, B. J., & Rossiter, H. B. (2011). Pulmonary O₂ uptake kinetics as a determinant of high-intensity exercise tolerance in humans. *J Appl Physiol* (1985), *110*(6), 1598-1606. doi: 10.1152/japplphysiol.01092.2010
- Murgatroyd, S. R., & Wylde, L. A. (2011). The power-duration relationship of high-intensity exercise: from mathematical parameters to physiological mechanisms. *J Physiol*, *589*(Pt 10), 2443-2445. doi: 10.1113/jphysiol.2011.209346
- Nimmerichter, A., Williams, C., Bachl, N., & Eston, R. (2010). Evaluation of a field test to assess performance in elite cyclists. *International Journal of Sports Medicine*, *31*(3), 160-166.
- Noordhof, D. A., Skiba, P. F., & de Koning, J. J. (2013). Determining anaerobic capacity in sporting activities. *Int J Sports Physiol Perform*, *8*(5), 475-482.

- Padilla, S., Mujika, I., Orbañanos, J., & Angulo, F. (2000). Exercise intensity during competition time trials in professional road cycling. *Medicine and science in sports and exercise*, 32(4), 850.
- Peronnet, F., & Thibault, G. (1984). Consommation maximale d'oxygène, endurance et performance en course à pied. *Macolin*, 7, 15-18.
- Peronnet, F., & Thibault, G. (1987). Physiological analysis of running performance: revision of the hyperbolic model. *J Physiol*, 82(1), 52-60.
- Peronnet, F., & Thibault, G. (1989). Mathematical analysis of running performance and world running records. *J Appl Physiol*, 67(1), 453-465.
- Peronnet, F., Thibault, G., Rhodes, E. C., & McKenzie, D. C. (1987). Correlation between ventilatory threshold and endurance capability in marathon runners. *Med Sci Sports Exerc*, 19(6), 610-615.
- Perrey, S., & Candau, R. (2002). Déterminants des différentes phases de la cinétique de la consommation d'oxygène chez l'homme. *Science & Sports*, 17(5), 220-233. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0765-1597\(02\)00150-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0765-1597(02)00150-8)
- Pfau, T., Witte, T. H., & Wilson, A. M. (2005). A method for deriving displacement data during cyclical movement using an inertial sensor. *Journal of Experimental Biology*, 208(13), 2503-2514.
- 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. (2014). Determination of Maximal Aerobic Power from the Record Power Profile to improve cycling training. *Journal of Science and Cycling*, 3(1), 26-31.
- 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. doi: 10.1080/00140138808966766
- Predine, E., Gimenez, M., & Serrano, E. (1989). Nouvelle méthode d'évaluation et d'entraînement à l'endurance en course chez des enfants d'âge scolaire. *STAPS. Sciences et techniques des activités physiques et sportives*(19), 7-15.
- Quod, M. J., Martin, D. T., Martin, J. C., & Laursen, P. B. (2010). The power profile predicts road cycling MMP. *International Journal of Sports Medicine*, 31(6), 397-401.
- Rodriguez-Marroyo, J. A., Villa, G., Garcia-Lopez, J., & Foster, C. (2012). Comparison of heart rate and session rating of perceived exertion methods of defining exercise load in cyclists. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 26(8), 2249-2257. doi: 10.1519/JSC.0b013e31823a4233
- Rusko, H. K. (1992). Development of aerobic power in relation to age and training in cross-country skiers. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 24(9), 1040-1047.
- Saltin, B. (1973). Oxygen transport by the circulatory system during exercise in man. In Keule (Ed.), *Limiting factors of physical performance* (pp. 235-252). Stuttgart: Thieme.
- Sassi, A., Marcora, S. M., Rampinini, E., Mognoni, P., & Impellizzeri, F. M. (2006). Prediction of time to exhaustion from blood lactate response during submaximal exercise in competitive cyclists. *European Journal of Applied Physiology*, 97(2), 174-180.

- Scherrer, J., & Monod, H. (1960). Le travail musculaire local et la fatigue chez l'Homme. *J Physiol (Paris)*, 52, 419-501.
- 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.
- Skiba, P. F., Chidnok, W., Vanhatalo, A., & Jones, A. M. (2012). Modeling the expenditure and reconstitution of work capacity above critical power. *Med Sci Sports Exerc*, 44(8), 1526-1532. doi: 10.1249/MSS.0b013e3182517a80
- Skiba, P. F., Fulford, J., Clarke, D. C., Vanhatalo, A., & Jones, A. M. (2014). Intramuscular determinants of the ability to recover work capacity above critical power. *Eur J Appl Physiol*. doi: 10.1007/s00421-014-3050-3
- Skiba, P. F., Jackman, S., Clarke, D., Vanhatalo, A., & Jones, A. M. (2014). Effect of work and recovery durations on W' reconstitution during intermittent exercise. *Med Sci Sports Exerc*, 46(7), 1433-1440. doi: 10.1249/MSS.0000000000000226
- Sundström, D., Carlsson, P., & Tinnsten, M. (2014). Comparing bioenergetic models for the optimisation of pacing strategy in road cycling. *Sports Engineering*, 17(4), 207-215. doi: 10.1007/s12283-014-0156-0
- Swain, D. P., & Wilcox, J. P. (1992). Effect of cadence on the economy of uphill cycling. *Medicine and science in sports and exercise*, 24(10), 1123-1127.
- Tanaka, H., Bassett Jr., D. R., Best, S. K., & Baker Jr., K. R. (1996). Seated Versus Standing Cycling in Competitive Road Cyclists: Uphill Climbing and Maximal Oxygen Uptake. *Canadian Journal of Applied Physiology*, 21(2), 149-154. doi: doi:10.1139/h96-013
- Thibault, G. (1988). *Modélisation de la performance en course à pied* Université de Montréal, Montréal.
- Thibault, G. (2009). Quel est votre capacité d'Endurance? In E. Faton (Ed.), *Sport et Vie* (Vol. 116, pp. 17-25).
- Thys, H. (2001). Place de l'énergie mécanique dans le déterminisme du coût énergétique de la locomotion. *STAPS*, 54, 131-143.
- Tokmakidis, S. P., Leger, L., Mercier, D., Peronnet, F., & Thibault, G. (1987). New approaches to predict VO₂max and endurance from running performances. *J SPORTS MED PHYS FITNESS*, 27(4), 401-409.
- Tornvall, G. (1963). Assessment of physical capabilities. *Acta Physiol Scand*, 58(Suppl 201), 1-102.
- 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. doi: 10.1249/mss.0b013e31802dd3e6
- 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. doi: 10.1249/MSS.0b013e318177871a
- 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. *Exp Physiol*, 93(3), 383-390. doi: 10.1113/expphysiol.2007.039883
- 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. *Exp Physiol*, 95(4), 528-540. doi: 10.1113/expphysiol.2009.050500
- Vanhatalo, A., & Jones, A. M. (2009). Influence of prior sprint exercise on the parameters of the 'all-out critical power test' in men. *Exp Physiol*, 94(2), 255-263. doi: 10.1113/expphysiol.2008.045229
- Vanhatalo, A., Jones, A. M., & Burnley, M. (2011). Application of critical power in sport. *Int J Sports Physiol Perform*, 6(1), 128-136.
- Villierius, V., Dupuis, P., & Grappe, F. (2007). *Détermination du profil physiologique des coureurs cyclistes compétitifs à partir de la mesure de la puissance développée : étude préliminaire*. Paper presented at the 12ème Congrès Internationale de l'ACAPS, Leuven.
- Vogt, S., Heinrich, L., Schumacher, Y. O., Blum, A., Roecker, K., Dickhuth, H. H., & Schmid, A. (2006). Power output during stage racing in professional road cycling. *Med Sci Sports Exerc*, 38(1), 147-151.
- Vogt, S., Roecker, K., Schumacher, Y. O., Pottgiesser, T., Dickhuth, H. H., Schmid, A., & Heinrich, L. (2008). Cadence-power-relationship during decisive mountain ascents at the Tour de France. *International Journal of Sports Medicine*, 29(3), 244-250.
- Vogt, S., Schumacher, Y. O., Blum, A., Roecker, K., Dickhuth, H. H., Schmid, A., & Heinrich, L. (2007). Cycling power output produced during flat and mountain stages in the Giro d'Italia: a case study. *Journal of Sports Sciences*, 25(12), 1299-1305.
- Vogt, S., Schumacher, Y. O., Roecker, K., Dickhuth, H. H., Schoberer, U., Schmid, A., & Heinrich, L. (2007). Power Output during the Tour de France. *International Journal of Sports Medicine*, 28(9), 756-761. doi: 10.1055/s-2007-964982
- Whipp, B., Huntsman, D., Storer, T., Lamarra, N., & Wasserman, K. (1982). *A constant which determines the duration of tolerance to high-intensity work*. Paper presented at the Federation Proceedings.
- Wilkie, D. (1980). Equations describing power input by humans as a function of duration of exercise. *Exercise bioenergetics and gas exchange*. Elsevier, Amsterdam, 75-80.
- Wood, R. E., Hayter, S., Rowbottom, D., & Stewart, I. (2005). Applying a mathematical model to training adaptation in a distance runner. *Eur J Appl Physiol*, 94(3), 310-316. doi: 10.1007/s00421-005-1319-2
- Wooles, A., Robinson, A., & Keen, P. (2005). A static method for obtaining a calibration factor for SRM bicycle power cranks. *Sports Engineering*, 8(3), 137-144. doi: 10.1007/bf02844014

ANNEXES

1. Co-auteur d'un article publié dans la revue internationale Journal of Science and Cycling.

J Sci Cycling. Vol. 2(2), 49-56

RESEARCH ARTICLE

Open Access

Effects of recovery using contrast water therapy or compression stockings on subsequent 5-min cycling performance

Arnaud Ménétrier¹ ✉, Julien Pinot², Laurent Mourot^{3,4}, Frédéric Grappe³, Malika Bouhaddi^{1,5}, Jacques Regnard^{1,5} & Nicolas Tordi^{4,6}

Abstract

Many researchers have investigated the effectiveness of contrast water therapy (CWT) or compression stockings (CS) during recovery, using subsequent performance as the principal outcome measure. However, data in the literature are contradictory, mainly because of the methodology used. Purpose: Based on well-controlled performance measures, this study aimed to compare the effects of CWT, CS or passive recovery (PR) on subsequent performance. Methods: After inclusion based on reproducibility criteria (intra-participant variability in performance test lower than the expected differences between the recovery interventions, i.e. 1.5%), 12 competitive male cyclists (peak power output: 5.0 ± 0.2 W/kg; cycling practice: 4.9 ± 0.4 times/week; intra-participant variability: $1.2 \pm 0.2\%$) came to the laboratory three times in a random crossover design. Each time visit, they performed a tiring exercise on a cycle ergometer, followed by a 5-min performance test during which the mean power output was recorded, separated by a 15-min recovery period during which a 12-min PR, CWT (1:2 (cold: 10-12°C to warm: 36-38°C) min ratio) or CS (~20 mmHg) was implemented. Results: Compared with PR (353.8 ± 13.1 W), performance was significantly higher after CWT (368.1 ± 12.3 W) and CS (360.5 ± 14.8 W). Moreover, performance was significantly higher after CWT than after CS. Conclusion: Athletes can use this information as a way of improving their performance in competition format using repeated high-intensity exercises in a short period of time, such as in mountain bike, track or BMX races. Moreover, these data reinforce interest for researchers to consider performance tests with high test-retest reproducibility, especially when small but real benefits are expected.

Keywords: recovery methods, water immersion, elastic compression, exercise reproducibility

✉ Contact email: arnaud.menetrier@laposte.net (A. Ménétrier)

¹ EA3920 Marqueurs Pronostiques et Facteurs de Régulations des Pathologies Cardiaques et Vasculaires, Plateforme Exercice Performance Santé Innovation, SFR FED 4234, Université de Franche-Comté, Besançon, France

² EA4660 Laboratoire Culture Sport Santé Société, Plateforme Exercice Performance Santé Innovation, Université de Franche-Comté, Besançon, France.

³ EA4660 Laboratoire Culture Sport Santé Société, Plateforme Exercice Performance Santé Innovation, Université de Franche-Comté, Besançon, France.

⁴ Centre d'Investigation Clinique INSERM CIT 808, CHRU de Besançon, France.

⁵ Exploration Fonctionnelles, CHRU de Besançon, France.

⁶ EA4267 Fonctions et Dysfonctions Epithéliales, Plateforme Exercice Performance Santé Innovation, SFR FED 4234, Université de Franche-Comté, Besançon, France.

Received: 18 Juny 2013. Accepted: 24 December 2013.

Introduction

In recent years, recovery interventions between repeated bouts of exhaustive exercise have become a major focus in the field of sports science (Barnett 2006). In order to remain efficient at a high level for subsequent performances, it is of fundamental importance to put the interspersed recovery period to good use. It is the case in competition format using

subsequent bouts of high-intensity exercise in a short period of time (series and final). In cycling, races from many disciplines take place in the form of tournament with several phases competed on a single day. Some races of mountain bike (cross-country eliminator), track (pursuits, points race, scratch, omnium...) and BMX consist in sequence of series, qualifying rounds and finals with short recovery times.

Nowadays, athletes therefore use a wide variety of passive strategies to accelerate short-term recovery. These passive strategies present the advantage to result in a greater amount of muscle glycogen resynthesis than active strategies (as active recovery) over the same duration (Choi et al. 1994). Compression garments and water immersion (including hot, cold and contrast water) are examples of passive strategies often studied and reviewed (Barnett 2006). Hot water immersion (<15°C) is assumed to be more beneficial in treatment of exercise-induced muscle damage following unaccustomed or eccentric (Bleakley et al. 2012) than between repeated high-intensity exercises (Parouty et al. 2010). Conversely, there is a growing body of evidence to support the use of compression stocking (CS) and contrast water therapy (CWT: alternation of brief exposures of contrasted temperatures: $\leq 15^\circ\text{C}$ to $\geq 35^\circ\text{C}$) between repeated high-intensity exercises (Chatard et al. 2004; Crampton et al.



2011; Versey et al. 2011). These recovery strategies are thought to increase blood flow and venous return through application of pressure to the limbs (Ménétrier et al. 2013). The promotion of blood circulation is suggested to be an effective method in removing the metabolic waste products that accumulate during this kind of exercise and, therefore, enhance recovery (Barnett 2006). Furthermore, the external pressure created by the water or the compression garments and the cold application may improve perceptions of recovery or 'wellbeing' reducing muscle soreness (Washington et al. 2000; Weiss and Duffy 1999). However to date, no study has yet compared CS and CWT directly, between exercise bouts where a short turnaround time (15-30 min) is required. This comparison could provide direction for athletic trainers, as a way of potentially improving the recovery of their athletes during subsequent bouts of exercise. Results of research into the effectiveness of CS (Chatard et al. 2004; Ménétrier et al. 2011) and CWT (Crampton et al. 2011; Stanley et al. 2012) using subsequent performance as the principal outcome measure are contradictory, whereas this outcome is of major importance. Compared with passive recovery (PR), only one study has reported significant effects of CS on subsequent performance (Chatard et al. 2004), while many studies have reported no change (Ali et al. 2007; Ménétrier et al. 2011; Scanlan et al. 2008). With regard to CWT, some studies have reported significant positive effects on subsequent performance (Crampton et al. 2011; Versey et al. 2011). Beyond differences in study design (involving different recovery period (Crampton et al. 2011; Stanley et al. 2012)), studied population (untrained or elite athletes (Chatard et al. 2004; Ménétrier et al. 2011)) or in application modalities of the recovery intervention (Crampton et al. 2011; Stanley et al. 2012); the main reason that could

interpretation of the results. When small benefits are expected (~2% after CS (Chatard et al. 2004) and ~3-8% after CWT (Crampton et al. 2011; Versey et al. 2011)) it seems warranted that more controlled studies are needed to ensure that differences are real. Thus, the intra-participant variability within repeated performance tests must be a key consideration for making pragmatic assumptions about the effectiveness of recovery interventions and must be lower than the expected effects of those (Hopkins et al. 2001).

Therefore, the aim of our study was to compare with PR, the effects on subsequent performance of CWT and CS. We intended to detect small but real benefits, using a sensitive methodology based on a well-controlled performance test with high test-retest reproducibility. Our hypothesis was that CWT and CS would significantly increase the cycling performance after a previous fatiguing exercise. Although no study has yet compared them directly, in light of results in the literature (Crampton et al. 2011; Ménétrier et al. 2011; Versey et al. 2011), we also hypothesized that this improvement would be greater after CWT. To provide more complete information for athletic trainers, we also compared the effects of CWT and CS on recovery parameters usually studied in the literature, such as blood lactate concentrations and muscular soreness perceptions.

Materials and methods

Design

We used a 5-min cycle ergometer test, during which the mean power output was registered (Chatard et al. 2004), to assess the effects of CWT and CS on the subsequent performance. This kind of exercise was chosen because of its strong reproducibility (Chatard et al. 2004). Based on the literature, the expected improvement in this performance test after CWT and

explain the contradictory results may be linked to the test-retest reproducibility of the performance test (Hopkins 2004). Indeed, the variability, expressed as a coefficient of variation (Hopkins et al. 2001), is often greater than the expected benefits of the studied recovery interventions and may confuse the

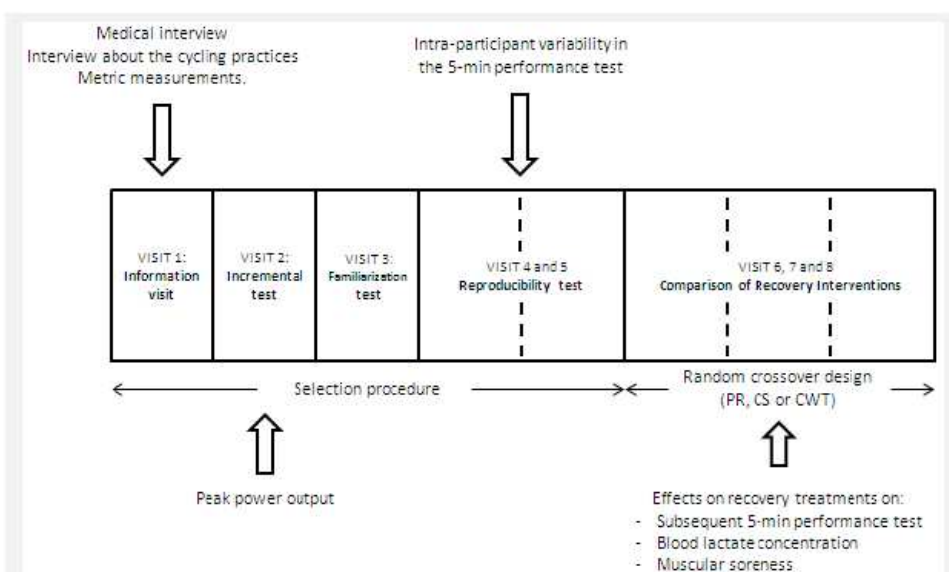


Figure 1. Experimental design.

Ménétrier et al. (2013). Effects of recovery using contrast water therapy or compression stockings on subsequent 5-min cycling performance. *Journal of Science and Cycling*, 2(2): 49-56

CS was 1.5% or more (Chatard et al. 2004; Crampton et al. 2011; Versey et al. 2011). Therefore participants able to reproduce a 5-min cycle ergometer test with a variability <1.5% were recruited (Hopkins et al. 2001). We calculated that 12 participants would be sufficient to show a difference of 1.5% or more between interventions in the cycle ergometer performance, with a beta risk of 10% and an alpha risk of 5%.

Our protocol comprised two parts:

-A selection procedure (5 visits) to recruit participants able to reproduce the 5-min maximal cycling exercise with a variability <1.5%.

-3 other visits in a random crossover design to compare the effects of the recovery interventions on the subsequent performance. These visits were designed to simulate a competition format using subsequent bouts of high-intensity exercise in a short period of time (series and final). Each time visit, the participants performed a tiring exercise on a cycle ergometer followed by the 5-min performance test, separated by a 15-min recovery period during which PR, CWT or CS was implemented.

Participants

After verbal and written explanation, volunteer participants underwent the selection procedure for potential inclusion (visits 1 to 5). The inclusion criteria were: (a) competitive male cyclists recruited in the regional cycling team (with an experience in competitive cycling of more than 5 years); (b) peak power output comprised between 4.5 and 6 W/Kg and cycling training between 4 and 6 times sessions/week (6 and 12 hours/week); elaborate on (c) context of competitive period (to minimize the possible training or habituation effect) (Sassi et al. 2008); (d) ability to reproduce the performance test used to compare the recovery interventions with a variability <1.5%, since as, based on the literature the expected improvement after CWT and CS was 1.5% or more (Chatard et al. 2004); (e) not familiarized with CS and CWT; (f) no history of systemic disease; and (g) no ongoing

medication.

The first 12 competitive male cyclists (mean \pm SEM age: 20.7 ± 0.6 years (19.0-23.0); height: 179.4 ± 1.4 cm (172.0-188.0); weight: 71.8 ± 1.6 kg (66.4-88.2); experience in cycling: 6.25 ± 0.4 (5.0-9.0); peak power output: 5.0 ± 0.2 W (4.5-6.0); cycling practice: 4.9 ± 0.4 times/week (4.0-6.0) (8.7 ± 0.7 hours/week (6.0-12.0)); intra-participant variability: $1.2 \pm 0.2\%$ (0.5-1.5)) who met the inclusion criteria were included, and performed the study protocol of the comparison of recovery interventions (visits 6 to 8). The results of the selection procedure are presented in Table 1.

Participants were provided verbal and written information of experimental procedures and signed informed consent statements and medical history forms before study initiation. The study protocol was approved by the local ethics committee, and the study was in accordance with the Declaration of Helsinki (Harriss and Atkinson 2009).

Testing Conditions

This study was performed in spring (context of competitive period) (Sassi et al. 2008). Participants were requested to abstain from competition and maintain constant life habits (nutrition, sleep, etc.). Only light training was tolerated.

Laboratory visits for the study purposes were performed at the same time of the day (between 6:00 and 9:00 PM) and in similar environmental conditions (temperature: $\sim 21^\circ\text{C}$, humidity: $\sim 30\%$), at intervals of 48 to 96 hours. Food was prohibited during the visits, but although participants had to drink 50 cl of water each time.

Selection Procedures

The selection procedure comprised five visits to the laboratory (visits 1, 2, 3, 4 and 5) to verify the inclusion criteria, as follows:

Visit 1 – Information Visit: The participants received verbal and written explanations before signing an informed consent document. Participants then had a medical interview; an interview about their cycling

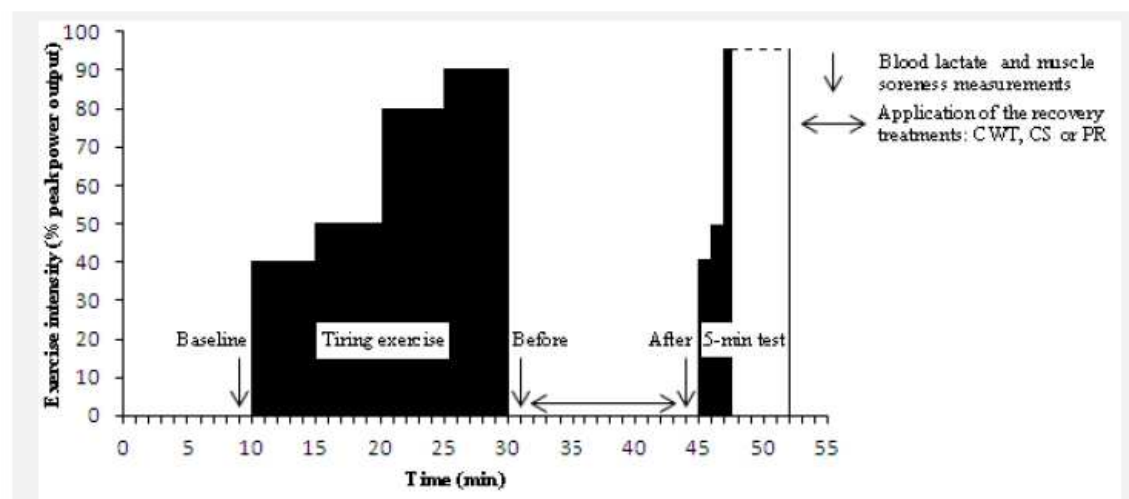


Figure 2. Design of the recovery interventions comparison.

practices; and metric measurements.

Visit 2 - Incremental Test: The second visit included an incremental test to exhaustion (start: 100 W, increments: 30 W/2 min) on a cycle ergometer (Wattbike, Nottingham, UK). Peak power output was recorded (Faria et al. 2005). Heart rate was recorded with a heart rate monitor (Suunto t6, Suunto, Oy, Finland). Peak heart rate during the incremental test was considered as the average value observed over the 15 sec period where heart rate was highest. Difficulty and exertion perceived by the participants at the end of the exercise were quantified using the CR10 Borg-scale (Borg et al. 1985). The state of exhaustion was validated by the achievement of the theoretical maximal heart rate ($220 - \text{age}$) and the maximal rating of perceived exertion (CR10 = 10).

Visit 3 - Familiarization Test: Participants underwent a familiarization trial in laboratory (same exercise bout proposed in visits 4 and 5) in order to get used to the experiment and to eliminate the training effect (Abbiss et al. 2008).

Visits 4 and 5 - Reproducibility Test: The participants' ability to reproduce the exercise used to compare the recovery interventions was tested. The two visits to establish the reproducibility comprised the same 5-min exercise bout on cycle ergometer preceded by a standardized warm-up (5 min at 40%, 5 min at 50% and 5 min at 60% of peak power output). Braking force was constant during the exercise and was calculated to obtain a pedaling frequency around 90–100 rpm. The mean power output developed by the participant during the trial was registered throughout via an interface between the cycloergometer and the computer and expressed in watts for 5 min. The only way to increase or reduce the power was to increase or reduce the pedaling frequency. During the protocol, participants were not informed about any performance results. In order to guide the participants, intensity was fixed at 95% of peak power output during the first 30 sec. After that, the time countdown was the only information communicated to the participants. Peak heart rate during reproducibility test was considered as the average value observed over the 15 sec period where heart rate was highest. Difficulty and exertion perceived by the participants at the end of the exercise were quantified to verify that the fatigue criteria were identical from one visit to the next.

Comparison of Recovery Interventions

Participants who were included in the study performed the laboratory protocol comprising three test visits (visits 6, 7 and 8), in a randomized order, to compare the three recovery interventions.

Visits 6, 7 and 8: These visits included 10 min at rest, a 10-min warm up (5 min each at 30% and 40% of peak power output) followed by a tiring exercise (5 min each at 80% and 90% of peak power output), then a 15-min recovery period during which one of the three 12-min recovery interventions was implemented, and finally a standardized warm up (40 sec each at 40%, 50% and 60% of peak power output) followed by a 5-min test on

cycle ergometer (Figure 1). During the 5-min test, the participants had to produce the greatest mean possible power output for the whole 5-min exercise. Braking force, pedaling frequency modalities and any other procedures were the same that as during the reproducibility test. The mean power output sustained by the participants over the 5-min test was registered to compare the performances achieved after each recovery intervention (Chatard et al. 2004). Blood samples (5 μL) were taken at the earlobe before tiring exercise (baseline), and before and after the application of the recovery interventions in a sitting position. The blood samples were immediately analyzed with the Lactate Pro device (Arkray, Kyoto, Japan) to measure blood lactate concentrations. The average value observed over the 15-sec period where heart rate was highest during both tiring exercise and 5-min test and difficulty and exertion as perceived by the participants at the end of the both exercises were quantified to assess fatigue criteria. A visual analogue pain scale (1-10) was used to assess muscular soreness whereby participants were required to rank their perception of soreness on a scale, with 0 being 'normal' and 10 being 'extremely sore' (Vaile et al. 2008). Pain ranking was reported at baseline and before and after the application of the recovery interventions.

Recovery Interventions

Recovery period included 1.5 min in a sitting position before and after the 12 min of recovery interventions, which consisted in resting in vertical position with garments used for cycling. For PR, the participants wore garments used for cycling only. For CS, the participants also wore full leg compression stockings from the ankle to the groin (Full Leg, Compressport, Geneva, Switzerland). According to the size chart provided by the manufacturer, the pressure applied by the CS is estimated to be 14, 27, and 15 mmHg at the thigh, calf and ankle respectively. For CWT, participants underwent 4 cycles of 3 minutes each, comprising immersion to the top of the thigh (~75 cm of water for a height of 180 cm) in a cold bath (10–12°C) for 1 min, followed by 2 min in a hot bath (36–38°C) with a 5-s changeover (Wilcock et al. 2006). With ~60 cm of water above the ankle, ~45 cm above the calf and ~15 cm above the thigh, the mean pressure applied by CWT is ~45 mmHg at the ankle, ~34 mmHg at the calf and 11 mmHg at the thigh.

Statistical Analyses

Statistical analyses were performed using SigmaStat for Windows 3.5 (Systat Software Inc., San Jose, CA, USA). Data are presented as mean \pm standard error of the mean (SEM). A p -value < 0.05 was considered statistically significant. Normality was tested using the Kolmogorov-Smirnov Test. Appropriate parametric or non-parametric tests were used. To assess the reproducibility of the participants (visits 4 and 5), mean power output and peak heart rate were analyzed using the paired Student t-Test and CR10 was analyzed using the Wilcoxon Signed Rank Test. To check that the state of exhaustion achieved during tiring exercise was

Ménétrier et al. (2013). Effects of recovery using contrast water therapy or compression stockings on subsequent 5-min cycling performance. *Journal of Science and Cycling*, 2(2): 49-56

identical between visits 6, 7 and 8, heart rate and CR10 were analyzed using One Way Repeated Measures ANOVA. To assess the effects of the recovery interventions, performance in 5-min test was also analyzed using One Way Repeated Measures ANOVA. Heart rate and CR10 during 5-min test were analyzed using Friedman's Repeated Measures ANOVA on Ranks. Blood lactate concentrations and muscular soreness data were analyzed using Two Way Repeated Measures ANOVA. Fisher's LSD Test was used for pairwise comparisons. Intra-participant variability is defined as the ratio of the standard deviation to the mean, which is known as the absolute value of the coefficient of variation, expressed as a percentage. We assessed the reliability of these data with the intraclass correlation coefficient: using a 2-way random effects model with single-measure reliability in which variance over the repeated session is considered. The ICC indicates the error in measurements as a proportion of the total variance in scores. As a general rule, we considered an intraclass correlation coefficient over 0.90 as high, between 0.80 and 0.90 as moderate, and below 0.80 as insufficient.

Results

Performance: After CWT ($+4.1 \pm 0.7\%$, $p < 0.001$) and CS ($+1.8 \pm 1.0\%$, $p < 0.05$), 5-min test performance (mean power output sustained over the 5-min) was higher than after PR. Moreover, performance was greater after CWT than after CS ($+2.2 \pm 0.8\%$; $p < 0.05$) (Figure 2A).

Blood Lactate Concentrations: No significant difference was observed in blood lactate concentrations before the recovery interventions. At baseline, blood lactate concentrations were $1.4 \pm 0.2 \text{ mmol.L}^{-1}$, $1.2 \pm 0.1 \text{ mmol.L}^{-1}$ and $1.3 \pm 0.1 \text{ mmol.L}^{-1}$ and before the application of the recovery interventions, blood lactate concentrations were $13.0 \pm 0.8 \text{ mmol.L}^{-1}$, $12.8 \pm 1.0 \text{ mmol.L}^{-1}$ and $12.3 \pm 1.0 \text{ mmol.L}^{-1}$ for PR, CS and CWT conditions respectively. After CWT ($5.7 \pm 1.0 \text{ mmol.L}^{-1}$, $p < 0.001$) and CS ($7.3 \pm 1.2 \text{ mmol.L}^{-1}$, $p < 0.05$), blood lactate concentrations were lower than after PR; and ($8.4 \pm 1.0 \text{ mmol.L}^{-1}$). Moreover, blood lactate concentrations were lower after CWT than after CS ($p < 0.05$) (Figure 2B).

Perceived Muscular Soreness: No significant difference was observed in muscular soreness before the recovery interventions. At baseline, muscular soreness were 0.0 au for the three visits and before the application of the

recovery interventions, muscular soreness were $7.0 \pm 0.3 \text{ au}$, $6.5 \pm 0.3 \text{ au}$ and $6.5 \pm 0.3 \text{ au}$ for PR, CS and

Table 1. Incremental and reproducibility tests results (n = 12). * In Mean Power Output.

| Visit 2: Incremental Test | |
|---|---------------------------|
| Peak power output (W.kg^{-1}) | 5.0 ± 0.2 |
| Peak heart rate (beats.min^{-1}) | 193.1 ± 2.7 |
| CR10 (au) | 10.0 ± 0.0 |
| Reproducibility Test | |
| Visit 4: | |
| Mean Power Output (W) | 360.1 ± 11.0 |
| Peak heart rate (beats.min^{-1}) | 193.1 ± 2.8 |
| CR10 (au) | 10.0 ± 0.0 |
| Visit 5: | |
| Mean Power Output (W) | 362.2 ± 10.9 |
| Peak heart rate (beats.min^{-1}) | 192.4 ± 2.6 |
| CR10 (au) | 10.0 ± 0.0 |
| Intra-participant variability* | $1.2 \pm 0.2\%$ (0.5-1.5) |
| Intraclass correlation coefficient* | 0.99 |

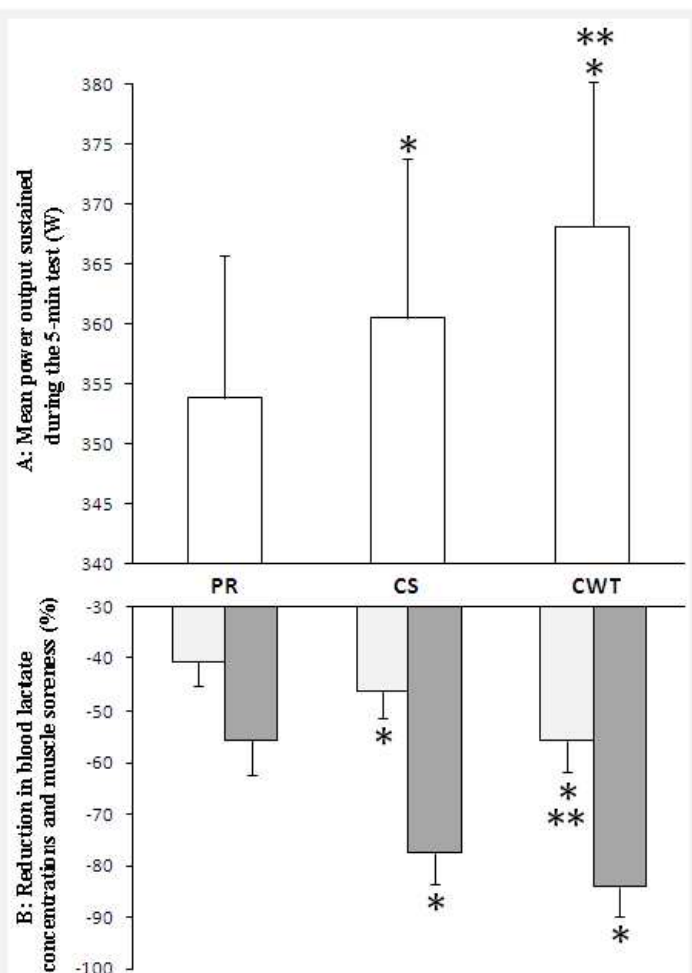


Figure 2. panel A: mean power output sustained over the 5-min test and panel B: reduction in blood lactate concentrations and muscle soreness (%) (Corresponding to: [(after the application of the recovery interventions data) / before the application of the recovery interventions data] * 100) during the three visits of the recovery interventions comparison. *: Indicates a significant difference between CWT or CS and PR. **: Indicates a significant difference between CWT and CS.

CWT conditions respectively. After CWT (1.1 ± 0.4 au, $p < 0.001$) and CS (1.6 ± 0.4 au, $p < 0.001$), muscular soreness were lower than after PR (3.2 ± 0.5 au). Moreover, muscular soreness were lower after CWT than after CS without attaining the significance threshold ($-29.2 \pm 12.2\%$; $p = 0.08$) (Figure 2B).

Heart Rate: Heart rates during tiring exercise (184.1 ± 1.6 beats.min⁻¹, 183.6 ± 2.2 beats.min⁻¹ and 182.1 ± 2.3 beats.min⁻¹ for PR, CS and CWT conditions respectively) and 5-min test (188.6 ± 2.3 beats.min⁻¹, 189.4 ± 1.9 beats.min⁻¹ and 190.2 ± 2.0 beats.min⁻¹ for PR, CS and CWT conditions respectively) were not statistically different for the three visits.

CR10: CR10 during tiring exercise (9.1 ± 0.3 au, 8.6 ± 0.2 au and 8.7 ± 0.2 au for PR, CS and CWT conditions respectively) and 5-min test (10.0 ± 0.0 au for the three visits) were not statistically different for the three visits.

Discussion

The present study aimed at testing the hypothesis that CWT and CS would significantly increase the subsequent cycling performance. We also hypothesized that this improvement would be greater after CWT. Contrary to most of the previous studies; this was done with a study design based on a well controlled performance test with high test-retest reproducibility.

Our results are in accordance with previous studies and confirm that CWT (Crampton et al. 2011; Versey et al. 2011) and CS (Chatard et al. 2004) significantly increased subsequent performance compared with PR, by increasing the mean power output sustained over the 5-min test by 14.2 ± 2.3 W and 6.7 ± 3.6 W, respectively. Moreover, greater benefits were apparent after CWT compared with CS (7.6 ± 2.7 W). However, our results also contrast with the findings of other authors, who have reported unchanged performance following CWT (Stanley et al. 2012) or CS (Ménétrier et al. 2011; Scanlan et al. 2008) when compared with PR. Discrepancies between results may depend on several factors, such as the period between the intervention and the tiring exercise, the duration of the recovery period (Stanley et al. 2012), or the application modalities of the recovery intervention. For example, when the pressure applied by the compression garments is too high, the blood flow may be decreased, while the main rationale to use CS during recovery is based on the blood flow increase (Sperlich et al. 2013). It also appears that more controlled, reliable and repeatable performance measures are needed to highlight potential differences between recovery interventions, especially when small benefits are expected (Hopkins 2004). These considerations justify the major focus of our study, since as such data are lacking in the literature. Any error in measurement may mask the effect of the recovery interventions (Ménétrier et al. 2011). Therefore it is necessary to measure the variability between repeated performance tests and to ensure that it is lower than the expected changes induced by the recovery interventions (Thomas et al. 2012). In order to reach this goal, several methodological aspects were

considered. Firstly, performing tests with a constant workload until exhaustion may yield individual performances with variations of more than 25% (Billat et al. 1994; Ménétrier et al. 2011). Therefore, given the strong reproducibility ($\sim 1.5\%$) observed with maximal cycling exercise for a fixed duration (Chatard et al. 2004), we used this exercise to assess the efficacy of the recovery interventions. Secondly, since with the expected improvement after CWT and CS was reported to be 1.5% or more (Chatard et al. 2004), we included only participants able to reproduce the 5-min maximal cycling exercise with a variability $< 1.5\%$. After a familiarization test, the intra-participant variability was $1.2 \pm 0.2\%$ and the ICC was 0.99. This high reproducibility was obtained by including only well trained cyclists, based on a high peak power output ($4.5\text{-}6$ W/kg) and cycling training ($4\text{-}6$ sessions/week, $6\text{-}12$ hours/week). Elite cyclists were not recruited because they are often justifiably reluctant to participate in controlled studies. The included participants had to be in a cycling phase (to minimize the possible training or habituation effect), but they were requested to cease competition participation during the study period (so as to not accumulate too much excessive fatigue). Additionally, all participants were previously accustomed to performing 5-min maximal exercise in training programs and competitions. With particular regard to the lack of improvements in subsequent performance most often observed with CS, this reproducible testing method with a low variability is able to detect small, but real, differences between CWT, CS and PR.

The current study also aimed to compare the effects of CWT and CS on recovery parameters usually studied in the literature, such as blood lactate concentrations and muscular soreness. Our finding of lower blood lactate concentrations following CWT and CS supports previous studies' reports of more pronounced lactate removal after CWT (Hamlin 2007; Morton 2007) and CS (Chatard et al. 2004). For an active recovery, it is well accepted that persistent low-intensity activity primarily increases blood lactate clearance by increasing muscle blood flow (Ahmaidi et al. 1996). Remaining in an upright position without moving during PR may limit the muscle pump and hence the blood lactate removal; thus, the effects of pressure caused by water and CS on the blood circulation may contribute to these changes. Studies conducted on the leg and forearm have shown that external compression may increase both venous return (Charles et al. 2011) and arterial flow rate (Bochmann et al. 2005). In addition, blood lactate removal was more pronounced after CWT compared with CS. The most probable explanations for this result are the differences in pressure gradient with CWT and CS (direction of the graduated compression: decreasing from ankle with CWT and progressive with CS; and level of compression: ~ 45 mmHg to the ankle with CWT (i.e. ~ 60 cm of water above ankle) and 15 mmHg with CS), but the current study was not designed to provide precise information on this point. The possible

Ménétrier et al. (2013). Effects of recovery using contrast water therapy or compression stockings on subsequent 5-min cycling performance. *Journal of Science and Cycling*, 2(2): 49-56

alternation of local vasoconstriction and vasodilatation during CWT may contribute to blood lactate removal. Results in the literature suggest that such an alternation exists but at subcutaneous level only (Fiscus et al. 2005; Myrer et al. 1994). To aid intramuscular blood lactate removal more effectively, temperature changes would surely be required at a deeper tissue level. Our findings of improved perceived recovery, characterized by lower muscular soreness, following CWT (Crampton et al. 2011; Stanley et al. 2012) and CS (Chatard et al. 2004) support previous findings reporting heightened perceptions of recovery or wellbeing following both CWT and CS. The pressure applied by CWT and CS may improve perceptions of recovery or 'wellbeing' (Weiss and Duffy 1999). Moreover, cold immersion during CWT may reinforce the effects of this type of recovery on muscular soreness (Washington et al. 2000) and explain the trend toward greater benefits compared with CS. Finally, although CWT and CS induce physiological and perceptive changes which may have a role in facilitating recovery from exercise, studies investigating the mechanisms concomitant with functional outcomes are needed to substantiate whether CWT and CS have an effect greater than simply a placebo or subjective improvement in recovery.

Practical applications

This study illustrates that when exhaustive physical exercises bouts must be repeated in a short period, the application of CWT or CS immediately after the first exercise bout improves subsequent performance. Moreover, if CWT is an available intervention, it should be used in priority compared with CS as additional performance benefits are offered. Coaches can use this information as a way of potentially improving performance of their athletes in competition format using subsequent bouts of high-intensity exercise. In cycling, these recommendations can be applied between each competition phases of mountain bike (cross-country eliminator), track (pursuits, points race, scratch, omnium...) and BMX races.

Furthermore, the results of this study reinforce interest for researchers in sports science to consider performance tests with high test-retest reproducibility, especially when small but real benefits are expected between the interventions.

In summary, this study showed a positive impact of 12-min recovery using CWT or CS on subsequent 5-min cycling performance compared with PR (+14.2 ± 2.3 W and +6.7 ± 3.6 W, respectively). Moreover, greater benefits were apparent after CWT compared with CS (+7.6 ± 2.7 W).

Acknowledgment

The authors would like to thank the participants for their time and enthusiasm. We also thank C. Capitan for technical assistance and F. Ecartot for editorial assistance. This study was supported by Compressport® and Wattbike. This study was funded by a Young Investigator Grant (Franche-Comté region) awarded to AM.

References

1. Abbiss CR, Levin G, McGuigan MR, Laursen PB (2008) Reliability of power output during dynamic cycling. *International journal of sports medicine* 29: 574-578
2. Ahmaidi S, Granier P, Taoutaou Z, Mercier J, Dubouchaud H, Prefaut C (1996) Effects of active recovery on plasma lactate and anaerobic power following repeated intensive exercise. *Medicine and science in sports and exercise* 28: 450-456
3. Ali A, Creasy RH, Edge JA (2007) Physiological effects of wearing graduated compression stockings during running. *European journal of applied physiology* 109: 1017-1025
4. Barnett A (2006) Using recovery modalities between training sessions in elite athletes: does it help? *Sports medicine* 36: 781-796
5. Billat V, Renoux JC, Pinoteau J, Petit B, Koralsztein JP (1994) Reproducibility of running time to exhaustion at VO₂max in subelite runners. *Medicine and science in sports and exercise* 26: 254-257
6. Bleakley C, McDonough S, Gardner E, Baxter GD, Hopkins JT, Davison GW (2012) Cold-water immersion (cryotherapy) for preventing and treating muscle soreness after exercise. *Cochrane database of systematic reviews (Online)* 2: CD008262
7. Bochmann RP, Seibel W, Haase E, Hietschold V, Rodel H, Deussen A (2005) External compression increases forearm perfusion. *Journal of Applied Physiology* 99: 2337-2344
8. Borg G, Ljunggren G, Ceci R (1985) The increase of perceived exertion, aches and pain in the legs, heart rate and blood lactate during exercise on a bicycle ergometer. *European journal of applied physiology and occupational physiology* 54: 343-349
9. Charles T, Mackintosh D, Healy B, Perrin K, Weatherall M, Beasley R (2011) Merino wool graduated compression stocking increases lower limb venous blood flow: a randomized controlled trial. *Advances in therapy* 28: 227-237
10. Chatard JC, Atlaoui D, Farjanel J, Louisy F, Rastel D, Guezennec CY (2004) Elastic stockings, performance and leg pain recovery in 63-year-old sportsmen. *European journal of applied physiology* 93: 347-352
11. Choi D, Cole KJ, Goodpaster BH, Fink WJ, Costill DL (1994) Effect of passive and active recovery on the resynthesis of muscle glycogen. *Medicine and science in sports and exercise* 26: 992-996
12. Crampton D, Donne B, Egana M, Warmington SA (2011) Sprint Cycling Performance Is Maintained With Short-Term Contrast Water Immersion. *Medicine and science in sports and exercise* 43: 2180-2188
13. Faria EW, Parker DL, Faria IE (2005) The science of cycling: physiology and training - part 1. *Sports medicine* 35: 285-312
14. Fiscus KA, Kaminski TW, Powers ME (2005) Changes in lower-leg blood flow during warm-, cold-, and contrast-water therapy. *Archives of physical medicine and rehabilitation* 86: 1404-1410
15. Hamlin MJ (2007) The effect of contrast temperature water therapy on repeated sprint performance. *Journal of science and medicine in sport* 10: 398-402
16. Harriss DJ, Atkinson G (2009) International Journal of Sports Medicine - ethical standards in sport and exercise science research. *International journal of sports medicine* 30: 701-702
17. Hopkins WG (2004) How to Interpret Changes in an Athletic Performance Test. *Sports science* 8: 1-7

18. Hopkins WG, Schabert EJ, Hawley JA (2001) Reliability of power in physical performance tests. *Sports medicine* 31: 211-234
19. Ménétrier A, Mourot L, Bouhaddi M, Regnard J, Tordi N (2011) Compression sleeves increase tissue oxygen saturation but not running performance. *International journal of sports medicine* 32: 864-868
20. Ménétrier A, Mourot L, Degano B, Bouhaddi M, Walther G, Regnard J, Tordi N (2013) Effects of Three Post-exercise Recovery Treatments on Femoral Artery Blood Flow Kinetics. *The Journal of sports medicine and physical fitness* (in press)
21. Morton RH (2007) Contrast water immersion hastens plasma lactate decrease after intense anaerobic exercise. *Journal of science and medicine in sport* 10: 467-470
22. Myrer JW, Draper DO, Durrant E (1994) Contrast therapy and intramuscular temperature in the human leg. *Journal of athletic training* 29: 318-322
23. Parouty J, Al Haddad H, Quod M, Lepretre PM, Ahmaidi S, Buchheit M (2010) Effect of cold water immersion on 100-m sprint performance in well-trained swimmers. *European journal of applied physiology* 109: 483-490
24. Sassi A, Impellizzeri FM, Morelli A, Menaspa P, Rampinini E (2008) Seasonal changes in aerobic fitness indices in elite cyclists. *Applied physiology, nutrition, and metabolism* 33: 735-742
25. Scanlan AT, Dascombe BJ, Reaburn PR, Osborne M (2008) The effects of wearing lower-body compression garments during endurance cycling. *International journal of sports physiology and performance* 3: 424-438
26. Sperlich B, Bom DP, Kaskinoro K, Kalliokoski KK, Laaksonen MS (2013) Squeezing the muscle: compression clothing and muscle metabolism during recovery from high intensity exercise. *PLoS One* 8: e60923
27. Stanley J, Buchheit M, Peake JM (2012) The effect of post-exercise hydrotherapy on subsequent exercise performance and heart rate variability. *European journal of applied physiology* 112: 951-961
28. Thomas K, Stone MR, Thompson KG, St Clair Gibson A, Ansley L (2012) Reproducibility of pacing strategy during simulated 20-km cycling time trials in well-trained cyclists. *European journal of applied physiology* 112: 223-229
29. Vaile J, Halson S, Gill N, Dawson B (2008) Effect of hydrotherapy on the signs and symptoms of delayed onset muscle soreness. *European journal of applied physiology* 102: 447-455
30. Versey N, Halson S, Dawson B (2011) Effect of contrast water therapy duration on recovery of cycling performance: a dose-response study. *European journal of applied physiology* 111: 37-46
31. Washington LL, Gibson SJ, Helme RD (2000) Age-related differences in the endogenous analgesic response to repeated cold water immersion in human volunteers. *Pain* 89: 89-96
32. Weiss RA, Duffy D (1999) Clinical benefits of lightweight compression: reduction of venous-related symptoms by ready-to-wear lightweight gradient compression hosiery. *Dermatology Surgery* 25: 701-704
33. Wilcock IM, Cronin JB, Hing WA (2006) Physiological response to water immersion: a method for sport recovery? *Sports medicine* 36: 747-765

2. Lettre aux éditeurs publiée dans la revue internationale *International Journal of Sport Medicine*

416 Letter to the Editor

J. Pinot, F. Grappe

Letter to the Editor

Dear Editors,

Prof Grappe and I read with interest the correspondence from Dr McGregor.

First, we would like to reiterate the context of our study. It should be recalled that the relationship between power output and time has been studied since the second part of the XXth century (between 1954 and 1965) by Drs. Monod and Scherrer who were the pioneers in this field. Thus, the power profile is derived from these early studies with the power output measurement from power-meters. The methodology used in our manuscript takes into account the concept of *power output – time* associated with the follow-up of the power output measured in different cyclists during training and competition. We track the evolution of 13 record PO from each training and competition of cyclists to plot a *Record Power Profile* (RPP, between 1 s to 4h) whereas Dr. Coggan assesses the level of the cyclists with only 4 measures from specific field tests between 5 s to a theoretical point (functional threshold power). His methodology is very different from ours. We have in common the assessment of the physical potential of a cyclist, but there are many methods in existence to do this.

With regard to the terminology "*Power profile*", before our paper was published, Quod et al. [2] also used the term "*Power profile*" in a recent study (referenced in our paper). Dr. Coggan is not listed amongst the references of this paper. Thus, our title and use of the term in question is in keeping with this previous paper, but we emphasise our specific methodology for the assessment as the "*Record Power Profile*" of the cyclist. Moreover, it should be remembered that the term "*power profile*" is used routinely to describe any appraisal of power measurements over time or distance, e.g. in Wingate testing and pacing strategy research, and the term has been used in these contexts certainly before 2000. Like us, Quod et al. [2] referenced the sort of software which Dr. McGregor eludes to in his letter.

Dr. Coggan's book [1] contains no scientific references that could justify its presence in the bibliography of a scientific publication. Thus, it was not possible to refer to Dr. Coggan in the redaction of our scientific article knowing that in the first revised version of our paper, the reviewers did not accept this kind of reference. Also, to the best of our knowledge, the studies conducted by Dr. Coggan about this topic are inexistent in the scientific literature. His works do not feature in any of the bibliographies of the articles associated with our manuscript. In France, we have no trace of Congress acts or other posts (only the article on the website TrainingPeaks.com). From there, it was difficult for us to reference his work in our paper.

An innovative character of our study is that, from our RPP we can determine 5 exercise intensity zones for the cyclist training process. In terms of the use of the word "new" in our paper, like all other researchers, we attempt to undertake novel and original studies, and this is a fundamental aspect of all articles which are peer-reviewed for all decent journals. Contribution to new knowledge is crucial in research and we maintain that our research work does contribute to new knowledge in a novel way. We are proud of this aspect.

From these explanations, we ask for your understanding.

Sincerely,

Julien Pinot and Frederic Grappe
Coaches of the FDJ – Bigmat Pro Cycling Team

References

- 1 Allen H, Coggan AR. Training and Racing with a Power Meter. 2nd Edition Boulder, CO: Inside Communications/VeloPress, 2010
- 2 Quod MJ, Martin DT, Martin JC, Laursen PB. The Power Profile predicts Road Cycling MMP. *Int J Sports Med* 2010; 31: 397–401

Correspondence

Julien Pinot, PhD Student

Health – Sport Department
EA 4660 Culture, Sport, Health, Society
UPFR Sports Besançon
University of Franche-Comte
julienpinot@laposte.net

Frederic Grappe, PhD

Health – Sport Department
EA 4660 Culture, Sport, Health, Society
Director of the Center of Sport Performance Optimisation
UPFR Sports Besançon
University of Franche-Comte
frederic.grappe@univ-fcomte.fr

3. Communication orale au 35^{ème} congrès de la Société de Biomécanique au Mans en 2010, ayant fait l'œuvre d'un article dans le supplément de la revue internationale *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*

Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering
Vol. 13, No. S1, September 2010, 103–104



The 'Power Profile' for determining the physical capacities of a cyclist

J. Pinot* and F. Grappe

EA-4267/2SBP, Research Department of Prevention, Innovation and Technico-Sporting Watching, University of Franche-Comté, Besançon, France

Keywords: cycling; Power Profile; physical capacities; longitudinal follow-up

1. Introduction

Monod and Scherrer have determined the concept of critical power (CP) by establishing a linear relation between the time to exhaustion (T_{ex}) and (1) the total work performed (Monod and Scherrer 1965) and (2) the distance covered (Scherrer 1958). To improve this concept, Peronnet and Thibault (1987) have suggested a more elaborate model that describes the relationship between the percentage of maximal aerobic velocity and the time of exercise from 7 min to 2 h. This model allows the evaluation of three physical capacities of an athlete: T_{ex} , CP and endurance. It is possible to ameliorate this model by determining the 'Power Profile' (PP) of a cyclist. The PP can assess more physical capacities (Figure 1) from the relationship between the maximum power output (PO_{max}) sustained (during trainings and competitions) and the time between 1 s and 4 h (Larrabal et al. 2006; Villerius et al. 2007). PO developed by a cyclist becomes a biomechanical variable of performance which is currently measured in routine directly on the bicycle during training and competition. For that, it is necessary to fix a powermeter on the bike (SRM training system or Powertap). The simplicity of use of these systems pushes the coaches and the cyclists to use PO for the training follow-up. As the level of PO is dependent on the exercise intensity, the analysis of PO during all the trainings and competitions permits the determination of the PP of the cyclist. From there, it is possible to make PP comparisons between (1) different cyclists according to the age and race category and (2) during a season for a cyclist.

The aim of this study was (1) to determine the PP during a competitive season for five cyclists of different fitness levels and (2) to analyse the inter- and intra-individual PP changes that can occur during 1 year.

2. Methods

During a cycling competitive season (February–September), five cyclists (22 ± 5 years old, 180 ± 3 cm and 66 ± 4 kg) of different levels (second category, first category, first category; member of the U23 French National team, professional in a Continental Pro Team; professional in a Pro Tour Team: top 5 in Giro and Vuelta) carried out their training and competitions with a powermeter (SRM or Powertap) on their bike. Twelve durations of the PO_{max} –time relationship were determined to emphasise the five physical capacities specific in cycling: explosiveness (1, 5 s), lactic tolerance (30 s), maximal aerobic power \sim 5 min, anaerobic threshold (20, 30, 45 and 60 min) and endurance (2, 3, 4 and 5 h) (Figure 1). The highest maintained PO value for each duration during the season was retained to determine the PP of each cyclist (PO was expressed in W/kg in order to make comparisons between the cyclists).

3. Results and discussion

The most important findings of this study are that (1) the PP allows the assessment of changes in the different physical capacities during a season for a cyclist (Figure 2) and (2) the higher the level of practice, the more the PO increases for an exercise duration (Figure 3). The level of PO is dependent on the cyclist's category. For example, at the anaerobic threshold (20–60 min), there is a mean difference of 1 W/kg between the cyclists in Pro Tour and second categories. Thus, it is possible to assess the different physical capacities for a cyclist from the PO_{max} –time relationship. The combination between the different physical capacities determines a standard PP for each athlete. This suggests that PP can represent a signature of the physical potential of the cyclist. The PP is a concept that appears very interesting for the longitudinal follow-up

*Corresponding author. Email: julienpinot@laposte.net
This abstract is affiliated with the Société de Biomécanique.

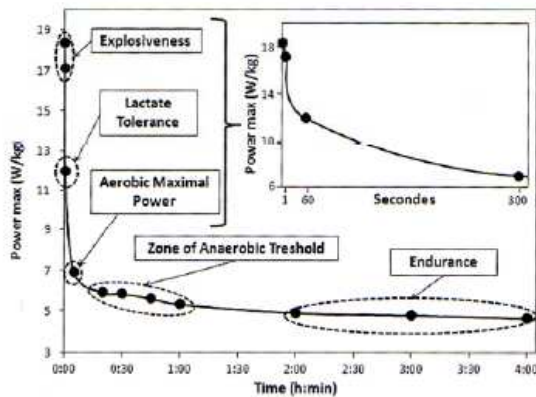


Figure 1. Determination of the different physical capacities of a cyclist from the PP.

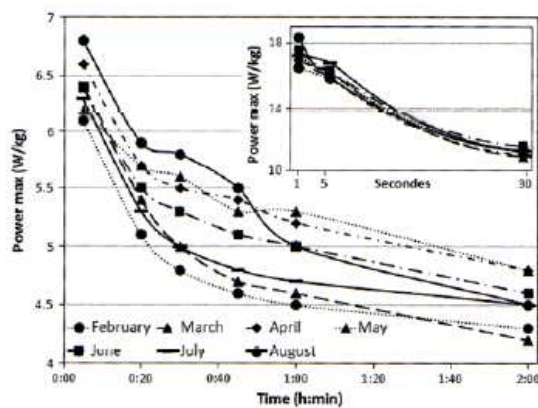


Figure 2. PO longitudinal follow-up per month for a cyclist from 1 s to 2 h durations.

of the athlete's fitness. The changes during the training follow-up allow the trainer to optimise the training process. One can follow the changes in the different physical aptitudes from the varying training loads and different kinds of races (flat, mountain, etc.). The work of the coach becomes more accurate with the possibility of making weekly/daily adjustments in the training process of the cyclist. With such training follow-up, the cyclist can

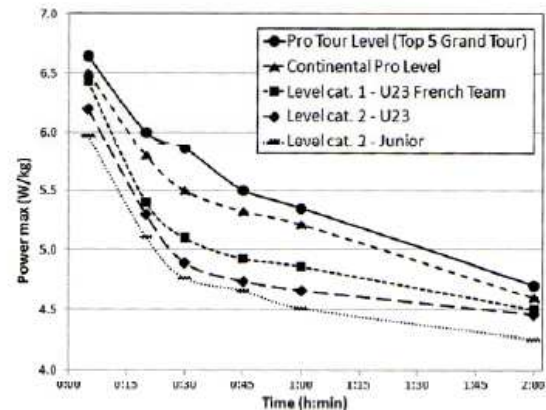


Figure 3. Changes in PP for five cyclists of different categories between 5 min and 2 h durations.

work with an overtraining prevention model and can optimise his performance capacity.

4. Conclusion

The training load longitudinal follow-up of a cyclist allows to determine his PP according to the PO_{max} -time relationship. One can observe the fitness changes of the athlete during the season. The PP can give a signature of the athlete's capacities.

References

- Larrazabal I, Iriberrri J, Muriel X. 2006. Power output related to exposure time in professional road cycling. Endurance Sports Science Conference, Birmingham.
- Monod H, Scherrer J. 1965. The work capacity of a synergic muscular group. *Ergonomics*. 8:329-338.
- Peronnet F, Thibault G. 1987. Analyse physiologique de la performance en course à pied: révision du modèle hyperbolique. *J Physiol*. 82:52-60.
- Scherrer J. 1958. Application aux épreuves sportives et à l'exercice physique des notions de travail et de temps-limite. *Med Ed Phys Sport*. 32:7-12.
- Villerius V, Dupuis P, Grappe F. 2007. Détermination du profil physiologique des coureurs cyclistes compétitifs à partir de la mesure de la puissance développée: étude préliminaire. 12ème congrès international de l'ACAPS, Leuven.

4. Communication orale au 36^{ème} congrès de la Société de Biomécanique à Besançon en 2011, ayant fait l'œuvre d'un article dans le supplément de la revue internationale *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*

Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering
Vol. 14, No. S1, August 2011, 219–220



The Peronnet–Thibault mathematical model applied to the record power profile in cycling

J. Pinot* and F. Grappe

Pôle Activité Physique et Sportive-EA-4267/2SBP, Université de Franche-Comté, Besançon, France

Keywords: cycling; power profile; physical capacities; endurance capability

1. Introduction

In cycling, the new concept of record power profile (RPP) allows the expression and the monitoring of the physical potential of the cyclist through the relationship between the different record power output (PO) and the time (Pinot and Grappe 2010, 2011). PO developed by a cyclist is becoming a biomechanical variable of performance, which is measured today in routine directly on the bicycle during training and competition. The RPP appears to be an innovative method for the cycling training process and the evaluation of the different physical capacities of the cyclist (Pinot and Grappe 2010).

In the 1980s, Peronnet and Thibault (1987, 1989) developed a physiological model of running performance. Their analysis provides a description of world running records. The model allows the computation of an objective measure of endurance: the index of endurance capability. They suggested that the slope of the relationship between the fractional utilisation of VO_2max and the running time from 7 min to 2 h (expressed on a logarithmic scale) may be a convenient index of endurance capability (Peronnet and Thibault 1987, 1989). Indeed, using the fractional utilisation of VO_2max , it is possible to compare the endurance capability in runners with different VO_2max and performance level. So, we wondered whether we could obtain the same relationship when applying this model within a broader range of time duration developed by the cyclists. To the best of our knowledge, that was not made yet.

The purpose of this study is to demonstrate that the relationship between the record PO expressed according to maximal aerobic power (%MAP) and the time (expressed on a logarithmic scale) is similar to the mathematical model of Peronnet and Thibault.

2. Methods

During a cycling competitive season (February–September), 20 cyclists carried out their training and competitions

with a powermeter (SRM Professional Training systems, Schoberer Rad Messtechnik, Jülich, Germany) on their bike. Their mean (+ SD) age, height, body mass and MAP were 24 ± 4 years, 178 ± 4 cm, 67 ± 6 kg and $6.4 \pm 0.4 \text{ W kg}^{-1}$, respectively. Ten cyclists were members of professional cycling teams. The others ($n = 10$) were elites and classed first category in France, six of whom belong to their U23 national team. All the cyclists were oriented to the high-performance level. All the data were analysed to determine the RPP of the cyclists. The different record PO corresponds to 9 maximal mean power (MMP) for times of 5, 10, 20, 30, 45, 60, 120, 180 and 240 min. The RPP of an athlete corresponds to the relationship between the 9 MMP and the different durations including all the races and trainings during one season of competition from a longitudinal PO follow-up. The PO in the RPP was expressed according to the cyclist's body weight (W kg^{-1}). We chose the records PO on 5 min to express MAP, unlike to Peronnet and Thibault (1987) who have fixed the time sustained at MAP (expressed in maximal oxygen consumption) to 7 min.

3. Results and discussion

The average RPP of the 20 cyclists expressed in W kg^{-1} according to a logarithmic scale of time represents a linear regression ($R^2 = 0.99$, $p < 0.0001$; Figure 1). The aerobic record PO linearly decreases between 5 min and 4 h similarly to the model of Peronnet and Thibault (Pinot and Grappe 2010). The record PO at 5 min (between 5.5 and 7 W kg^{-1}) was close to PO at MAP evaluated in laboratory from incremental exhaustion test (Lucia et al. 2001; Faria et al. 2005). The Peronnet and Thibault model takes into account the performances between 3000 m and marathon (between 7 min and ~ 2 –3 h). In cycling, the average durations of the professional road races are between 5 and 7 h. In our cyclist population, half are elite cyclists and the races do not exceed 5 h. So, we took the record PO up to 4 h.

*Corresponding author. Email: julienpinot@laposte.net

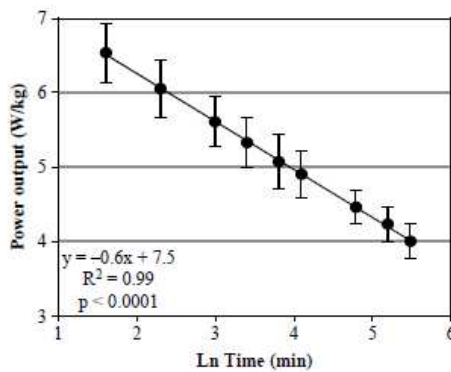


Figure 1. Average RPP expressed on a logarithmic scale of time for the 20 cyclists.

Our model allows the representation of the aerobic potential of the cyclist according to a linear regression following the equation:

$$PO = -0.6 \ln T + 7.5 \text{ (with } \ln T \\ = \text{ natural logarithm of cycling duration in minutes).}$$

If the decrease in PO (between 5 min and 4 h) is converted in the reduction of the fractional utilisation of MAP (%MAP), the relationship is also a linear regression ($R^2 = 0.99$, $p < 0.0001$; Figure 2). Thus, the relationship is similar to that observed by Peronnet and Thibault with the runners from speed measurements.

A definition generally employed for the endurance capability is the capacity to decrease the loss of power with the increase of the exercise duration (Peronnet and Thibault 1987). So, our results suggest that the slope of the linear regression between the record PO and the $\ln T$ could be an index of the endurance capability in cycling.

The mean index of endurance found in our study is -9.8 that does not correspond exactly to the index values that Peronnet and Thibault found with the runners (-4 to -8).

A future study will deal with the analysis of the index of endurance in cyclists with different skills and competition levels.

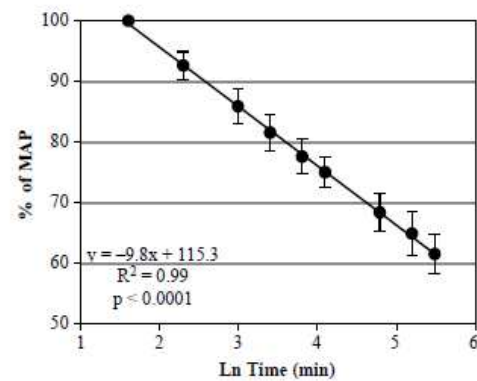


Figure 2. Reduction of PO expressed in %MAP with total cycling time for the 20 cyclists.

4. Conclusions

The results of this study show that the relationship between the fractional utilisation of MAP (according to the record PO) and the time (expressed on a logarithmic scale) is linear from a longitudinal PO follow-up among a heterogeneous population of cyclists. So, the Peronnet and Thibault model seems to be suitable with record PO measurements in cycling to determine an index of endurance from the slope of the relationship.

References

- Faria EW, Parker DL, Faria IE. 2005. The science of cycling. Physiology and training-part 1. *Sports Med.* 35(4):285–312.
- Lucia A, Hoyos J, Chicharro JL. 2001. Physiology of professional road cycling. *Sports Med.* 31(5):325–337.
- Peronnet F, Thibault G. 1987. Analyse physiologique de la performance en course a pied, révision du modèle hyperbolique. *J Physiol.* 82:52–60.
- Peronnet F, Thibault G. 1989. Mathematical analysis of running performance and world running records. *J Appl Physiol.* 67: 453–465.
- Pinot J, Grappe F. 2010. The power profile to determining the physical capacities of a cyclist. *Comput Meth Biomech Biomed Eng.* 13:103–104.
- Pinot J, Grappe F. 2011. Interest of the record power profile in cycling. *Int J Sports Med.* (Submitted).

5. Communication orale au 14^{ème} congrès de l'ACAPS à Rennes en 2011.

O61- Indice d'endurance et profil de performance en cyclisme : étude préliminaire

Julien Pinot¹ & Frédéric Grappe¹

¹ Equipe Culture, Sports, Santé, Société (C3S), UPFR-Sports, Besançon
julienpinot@laposte.net

Le Profil de Puissance Record (PPR) est un concept intéressant dans le processus d'entraînement en cyclisme ; il correspond à la relation « puissance mécanique ($P_{méca}$) record – temps » d'un athlète. A partir du PPR, il est possible de dresser la relation linéaire entre la diminution du pourcentage de Puissance Maximale Aérobie et le logarithme du temps (% PMA - Ln t) sur des efforts de 5 min à 4 h. L'Indice d'Endurance (IE, Peronnet & Thibault, 1987) a été étudié sur 4 cyclistes professionnels à partir d'un suivi longitudinal de leur $P_{méca}$ à l'entraînement et en compétition. Les résultats préliminaires montrent qu'à partir de la mesure de la $P_{méca}$ en cyclisme il est également possible d'obtenir une relation entre le % PMA et le logarithme du temps permettant de déterminer un IE pour chaque cycliste.

Keywords: Cyclisme, Puissance mécanique, Endurance, Potentiel physique

INTRODUCTION

L'analyse de la puissance mécanique ($P_{méca}$) est aujourd'hui utilisée en routine lors du processus d'entraînement en cyclisme. Le Profil de Puissance Record (PPR) permet l'évaluation et le suivi du potentiel physique du cycliste à partir de la relation entre les $P_{méca}$ records (établies en compétition et à l'entraînement) et le temps (Pinot & Grappe, 2011). Peronnet et Thibault (1987, 1989) ont développé un modèle physiologique de la performance en course à pied qui permet de déterminer l'Indice d'Endurance (IE) d'un athlète. Cet indice correspond à la pente de la droite de régression entre la fraction d'utilisation de la VO_2max et le logarithme du temps entre 7 min et ~2 h. L'IE donne une information sur le potentiel endurant chez les athlètes. A ce jour, aucune étude n'a été conduite en cyclisme sur cette relation entre le pourcentage de Puissance Maximale Aérobie et le temps (% PMA – Ln t). Le but de cette étude préliminaire est 1) de déterminer les IE à partir du PPR chez 4 cyclistes professionnels ayant des profils différents et 2) comparer les IE obtenus à ceux rapportés en course à pied.

METHODES

Durant une période de 10 mois, 4 cyclistes professionnels (26 ± 5 ans, 181 ± 3 cm ; 70 ± 4 kg) ont réalisé leurs entraînements et compétitions avec un capteur de puissance SRM (Schoberer Rad Messtechnik, Jülich, Germany (Gardner et al., 2004)) fixé sur leur vélo. Chaque cycliste possédait un profil bien distinct défini à partir des performances réalisées en compétition, i.e. sprinteur, grimpeur, rouleur et mixte (sans qualité prédominante). Tous les fichiers SRM de chaque sujet ont été collectés afin de déterminer le PPR à partir des $P_{méca}$ records sur 5, 20, 30, 45, 60, 120, 180 et 240 min. Les $P_{méca}$ étaient normalisées par rapport à la masse des cyclistes (W/kg). La $P_{méca}$ record sur 5 min était considérée correspondante à la PMA.

RESULTATS

La figure 1 montre qu'il n'existe pas de différence significative (ANOVA) entre les 4 cyclistes à partir de la relation logarithmique entre les $P_{méca}$ records et le temps. Lorsque les PPR sont exprimés linéairement pour déterminer l'IE à partir de la relation % PMA – Ln t , le temps a une influence significative (ANOVA) ($p < 0.05$) sur la diminution du % PMA. Les tests post-hoc ne montrent aucune différence significative d'IE entre les sujets : sprinteur (IE = -8,1 ; $R^2 = 0,97$; $p < 0,001$), rouleur (IE = -9,9 ; $R^2 = 0,99$; $p < 0,001$), mixte (IE = -10,1 ; $R^2 = 0,99$; $p < 0,001$) et grimpeur (IE = -10,3 ; $R^2 = 0,99$; $p < 0,001$). En revanche, on observe d'autres tendances entre les cyclistes (voir figure 2).

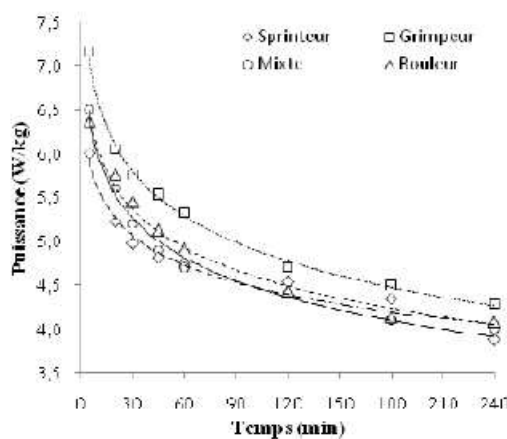


Figure 1 : Profil de Puissance Record des 4 cyclistes (Pointillés : grimpeur, tirets : rouleur, trait plein : mixte, trait discontinu : sprinteur).

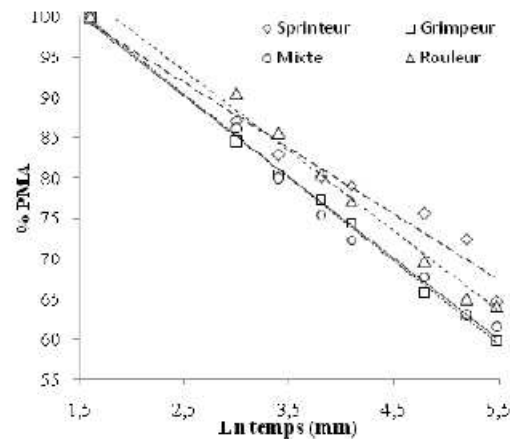


Figure 2 : Relations % PMA – Ln t des 4 cyclistes (Pointillés : grimpeur, tirets : rouleur, trait plein : mixte, trait discontinu : sprinteur).

DISCUSSION

Les résultats montrent que malgré des profils de performance très différents, les 4 cyclistes possèdent des IE très proches les uns des autres. Les IE obtenus (entre -8 et -10) montrent des ordres de grandeur différents comparés à ceux obtenus par Peronnet et Thibault (entre -4 et -8) en course à pied. Le fait que la $P_{méca}$ s'exprime avec le cube de la vitesse de déplacement peut en partie expliquer ces différences. Comme l'a souligné Vandewalle (2008), on observe que plus la courbe du PPR est incurvée, plus l'IE est faible à l'instar du sprinteur. Selon Péronnet et Thibault, plus l'IE est faible (se rapprochant de 0) et plus le potentiel d'endurance est élevé. L'IE traduisant la faculté à soutenir un haut pourcentage de PMA pour un temps donné ne semble pas lié au profil du coureur en cyclisme puisque pour quatre profils différents les IE sont relativement proches. Peronnet et Thibault ont souligné que le poids de l'IE était moindre comparé à celui de la VO_2max dans la réalisation d'une performance en endurance. Une erreur de 1% de la PMA peut provoquer jusqu'à 16% d'erreur dans la pente de la relation % PMA – Ln t (Vandewalle 2008). Ainsi, la détermination d'un IE fiable répond nécessairement à un PPR précis obtenu à partir de mesures valides de la $P_{méca}$ sur une durée assez longue (plusieurs mois) afin de se rapprocher le plus possible des records de $P_{méca}$ entre des durées comprises entre 5 min et 4h.

CONCLUSION

Cette étude préliminaire montre que les pentes obtenues à partir de la relation % PMA – Ln t permettent de définir des IE propres à chaque cycliste. Les résultats ne montrent pas de différence significative d'IE en fonction du profil de coureur. De futures études conduites sur un échantillon plus important de cyclistes de niveaux et de profils différents permettront de mieux analyser l'IE et son influence sur la performance en cyclisme.

BIBLIOGRAPHIE

- Gardner AS, Stephens S, Martin DT, Lawton E, Lee H, Jenkins D. *Accuracy of SRM and Powertap monitoring systems for bicycling*. Med Sci Sports Exerc 2004; 36: 1252-1258
- Peronnet, F. & Thibault, G. (1987). *Analyse physiologique de la performance en course à pied, révision du modèle hyperbolique*. J Physiol. 82, 52-60
- Peronnet, F. & Thibault, G. (1989). *Mathematical analysis of running performance and world running records*. J Appl Physiol. 67, 453-465
- Pinot, J. & Grappe, F. (2011). *The record power profile to assess performance in elite cyclists*. Int J Sports Med. 32, 1-6
- Vandewalle H. (2008). *Puissance critique : passé, présent et futur d'un concept*. Science & Sports. 23, 223-230

6. Communication orale au 15^{ème} congrès de l'ACAPS à Grenoble en 2013.

06-3 |

Analyse de la puissance mécanique au niveau du bassin en position danseuse en cyclisme

Pinot Julien^{1,2}, Kevin Rinaldi¹ & Grappe Frédéric^{1,2}

¹EA4660 Laboratoire C3S, Département Sport-Santé, UPFR des Sports Besançon, Université de Franche Comté; ²Equipe cycliste professionnelle FDJ
julienpinot@laposte.net

Mots clés (5 au maximum) : Puissance Mécanique ; Energie ; Technique de pédalage ;

INTRODUCTION

En montée, la plus grande partie de la puissance mécanique ($P_{méca}$) développée par le cycliste sert à lutter contre la gravité. Alors que sur un parcours plat le cycliste reste majoritairement en position assise, lorsqu'il roule en montée il alterne souvent entre les positions assise et danseuse selon différents paramètres : le pourcentage et la longueur de la pente, le développement utilisé, l'expérience et ses dimensions corporelles. En passant de la position assise à celle en danseuse, le redressement du buste et l'avancée du bassin permettent des oscillations du corps et du vélo qui entraînent une modification de l'orientation des forces appliquées sur la pédale (Caldwell et al., 1998). L'alternance entre les deux positions permet au cycliste de mettre en action différemment la chaîne musculaire des membres inférieurs et de profiter d'une force externe positive qui s'ajoute à la phase de poussée de la pédale : la gravité avec le poids du corps (Duc et al, 2008). Au niveau physiologique, Millet et al, (2002) ont montré qu'il n'existait aucune différence en termes d'efficacité et de rendement entre les positions assise et danseuse. L'étude des oscillations du bassin en danseuse autorise l'analyse de l'énergie mécanique à partir des variations de vitesses créées lors de chaque coup de pédale. A notre connaissance, aucune étude n'a encore mesuré l'énergie mécanique au niveau du bassin dans cette condition. L'objectif de cette étude a été de comparer la $P_{méca}$ totale développée au niveau du bassin (P_{bassin}) avec la $P_{méca}$ utile à l'avancement mesurée au niveau du moyeu de la roue arrière (P_{roue}) avec un groupe de cyclistes compétiteurs élites. P_{bassin} et P_{roue} ont également été comparées avec la $P_{méca}$ estimée à partir d'un modèle théorique ($P_{théo}$).

METHODES

Treize cyclistes élites (23 ± 4 ans, 177 ± 5 cm et 65 ± 8 kg) ont participé à cette étude. La mesure de P_{bassin} a été réalisée à l'aide d'un bras cinématique (Belli et al., 1992) consistant en 4 segments en aluminium reliés entre eux par 3 articulations mono-axiales. L'extrémité du bras était reliée à une ceinture attachée au bassin du sujet. L'exercice se déroulait avec le vélo personnel de chaque cycliste équipé d'une roue arrière possédant un capteur de puissance Powertap (CycleOps, Madison, USA) sur un tapis roulant motorisé (S1830, HEF Techmachine, Andrézieux-Bouthéon, France). La $P_{théo}$ a été calculée d'après la formule utilisée par Henchoz et al. (2010). Après une séance d'habituatation sur le tapis, chaque cycliste effectuait 4 paliers de 2 min sur 4 pentes différentes (5, 7, 9 et 11%) à des vitesses normalisées en fonction d'une $P_{méca}$ constante équivalente à 4,6 W/kg. Trois enregistrements de 10 secondes en positions assise et danseuse étaient effectués sur chaque palier.

RESULTATS

Tableau 1. $P_{méca}$ (W/kg) calculées selon les 3 méthodes différentes

| (W/kg) | 5% | 7% | 9% | 11% |
|--------------------------------|-------------|-------------|------------|------------|
| | Moy | Moy | Moy | Moy |
| $P_{théo}$ | 4,5 ± 0,2 | 4,6 ± 0,2 | 4,6 ± 0,1 | 4,7 ± 0,1 |
| P_{roue} | 4,6 ± 0,3 | 4,6 ± 0,2 | 4,6 ± 0,2 | 4,7 ± 0,2 |
| P_{bassin} | 29,7 ± 19,6 | 22,6 ± 12,6 | 19,7 ± 9,9 | 16,4 ± 7,7 |
| $P_{bassin\text{potentielle}}$ | 1,3 ± 1,1 | 1,4 ± 1,7 | 1,2 ± 1,3 | 1,2 ± 1,3 |
| $P_{bassin\text{cinétique}}$ | 29,5 ± 19,5 | 21,9 ± 13,2 | 19,8 ± 9,8 | 16,4 ± 8,1 |

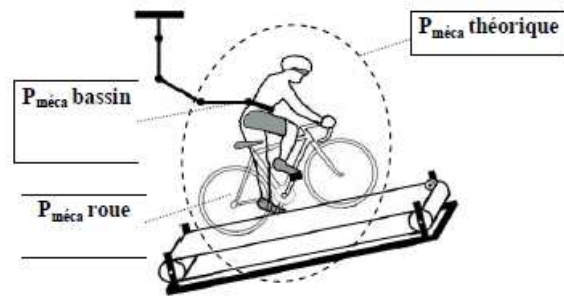


Figure 1. Représentation du cycliste équipé du bras cinématique sur le tapis roulant

L'analyse ANOVA indique que P_{bassin} totale est significativement plus élevée (4 à 7 fois plus élevée selon la pente) que P_{roue} et $P_{théo}$. P_{bassin} cinétique représente entre 90 et 95 % de P_{bassin} totale et est largement prédominante par rapport à la part de P_{bassin} potentielle. D'importantes différences interindividuelles sont observées entre les cyclistes au niveau de P_{bassin} . $P_{théo}$ et P_{roue} sont similaires, ce qui confirme la validité de la mesure de P_{roue} .

DISCUSSION & CONCLUSION

Les résultats montrent que lorsque le cycliste est en danseuse, les oscillations du bassin produisent une importante quantité d'énergie mécanique largement supérieure à celle utile pour la locomotion. En effet, P_{roue} ne représente que 15 à 30 % de P_{bassin} selon la pente. Cela suggère qu'une importante quantité d'énergie produite au niveau du bassin est dissipée lors du mouvement de pédalage en danseuse. En passant de la position assise à celle en danseuse, le bassin s'élève et s'avance pour ne plus être en appui sur la selle. Cette nouvelle posture modifie l'action des chaînes musculaires des membres inférieurs et supérieurs et donc la transmission des forces sur les pédales. En position assise, le mouvement de pédalage est produit par l'action essentiellement concentrique de la chaîne musculaire des membres inférieurs. Cependant Hawkins & Hull (1990) ont montré qu'il pouvait exister un petit stockage d'énergie élastique. Ainsi, à partir d'une technique efficace, certains cyclistes pourraient utiliser un petit supplément d'énergie mécanique gratuite dans la production de puissance en danseuse. Les importantes différences interindividuelles de P_{bassin} entre les sujets montrent qu'il existe des techniques en danseuse très différentes d'un cycliste à l'autre. Certains à l'aise, sont fréquemment en danseuse en montée alors que d'autres moins à l'aise, roulent plus souvent assis. De futures études devront montrer s'il existe un modèle biomécanique idéal du pédalage en danseuse dans différents pourcentages en montée.

BIBLIOGRAPHIE

- Belli, A., Rey, S., Bonnefoy, R., Lacour J.R. (1992). A simple device for kinematic measurements of human movement. *Ergonomics*, 35 (2), 177-186.
- Caldwell, G., Li, L., McCole, S., Hagberg, J. 1998. Pedal and crank kinetics in uphill cycling. *Journal of Applied Biomechanics*, 14, 245-259.
- Duc, S., Bertucci, W., Pernin, J.N., Grappe, F. 2008. Muscular activity during uphill cycling : effect of slope, posture, hand grip position and constrained bicycle lateral sways. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 18, 116-127.
- Hawkins, D., Hull, M. 1990. A method for determining lower extremity muscle-tendon lengths during flexion/extension movements. *Journal of Biomechanics*, 23 (5), 487-794.
- Henchoz, Y., Crivelli, G., Borrani, F., Millet G. 2010. A new method to measure rolling resistance in treadmill cycling. *Journal of Sport Sciences*, 28 (10), 1043-1046.
- Millet, G., Tronche, C., Fuster, N., Candau, R. (2002). Level ground and uphill cycling efficiency in seated and standing positions. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 34 (10), 1645-1652.

7. Communication orale au 2^{ème} World Congress of Cycling Science à Leeds en 2014, ayant fait l'œuvre d'un article dans le supplément de la revue internationale Journal of Science and Cycling

2nd World Congress of Cycling Science, 2nd and 3rd July 2014, Leeds

J Sci Cycling, Vol. 3(2), 43

BOOK OF ABSTRACTS

Open Access

Comparison of power output demands for a top-10 ranking between Tour de France and Vuelta a España

J Pinot^{1,2}✉ and F Grappe^{1,2}

Abstract

Background: Grand Tours (GT) are extreme endurance cycling events with about 3500 km covered in twenty-one stages during three weeks. Using the heart rate measurement, Lucia et al. (Lucia et al., 2003: Medicine & Science in Sports & Exercise, 35(5), 872-878) showed that the total exercise load (volume x intensity) do not differ between the Tour de France (TdF) and Vuelta a Espana (VaE). Since powermeters are daily used by the professional cyclists, there are some studies which investigated power output (PO) during Grand Tour but none has made PO measurement on a top-10 overall ranking cyclist to compare PO in different intensity zones in TdF and VaE.

Purpose: The purpose of this study was to compare the physical performance level between TdF and VaE of a top-10 overall ranking cyclist from PO measurements.

Methods: The PO data of a cyclist (23 yrs, 180 cm and 65 kg) who finished in the top-10 overall ranking in TdF 2012 (10th) and VaE 2013 (7th) were analysed to evaluate the physical performance level on each race from 1/ the determination of the Record Power Profile (RPP) of TdF and VaE according to the methodology of Pinot and Grappe (Pinot & Grappe, 2011: International Journal of Sports medicine, 32, 839-844) and 2/ the comparison of the maximal efforts in the five exercise intensity zones defined from the RPP.

Results: Figure 1 shows the RPP of the cyclist in TdF and VaE. The performance level in the low part of the severe intensity (zone 3) is similar in the two GT (Table 1). In the heavy intensity (zone 2) there is a slight increase (+1.6%) of the performance level in VaE. The level of performance in moderate intensity (zone 1) and in force-velocity (zone 5) are higher in the TdF (5.1% and 2.6%, respectively) while it's the opposite in the high part of severe intensity (zone 4) (+6.9% in VaE).

Discussion: This study shows that the maximal efforts made between 5 and 60 min both in the TdF and VaE are very close in a top-10 overall ranking. This result means that the cyclist performed in the heavy and in the low part of the severe intensity zones at the same physical level of performance in the two GT although the characteristics of the roads were different (11 summit finishes & 36 km of individual time trials (ITT) in VaE 2013 vs. 4 summit finishes in TdF 2012, longer stages (+8%) and 100 km of ITT). The results are in accordance with the specificity of the efforts performed between the maximal aerobic power (MAP) and the anaerobic threshold to get a ranking in the top 10 in a GT. Indeed, the general classification in a GT usually plays in mountain ascents and during ITT. The shorter and steeper finish ascents in VaE could explain why the record PO between 30 sec and 5 min were higher than in TdF. The higher level of performance in TdF in moderate intensity is due to a long breakaway of the cyclist performed to go win a stage.

Conclusion: To achieve an overall ranking top 10 in a GT, the level of performance in the heavy and in the low part of the severe intensity zones is essential. To get there, the levels of both MAP and anaerobic threshold must be the highest possible.

✉ Contact email: julien.pinot@univ-fcomte.fr (J Pinot)

¹ EA4660, C3S Health - Sport Department, University of Franche Comte, Besançon, France

² FDJ.fr Pro Cycling Team, Moussey le Vieux, France

Received: 1 May 2014. Accepted: 1 June 2014.





Comparison of power output demands for a top-10 ranking between Tour de France and Vuelta a Espana

J. Pinot^{1,2} & F. Grappe^{1,2}

¹ University of Franche Comte, EA4660, C3S Health - Sport Department, Besançon, France, ² FDJ.fr Pro Cycling Team, Moussey-le-Vieux, France



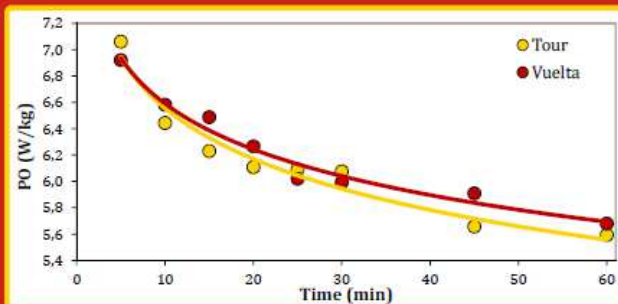
Introduction

Grand Tours (GT) are extreme endurance cycling events with about 3500 km covered in twenty-one stages during three weeks. Using the heart rate measurement, Lucia *et al.* [1] showed that the total exercise load (volume x intensity) do not differ between the Tour de France (TdF) and Vuelta a Espana (VaE). Since powermeters are daily used by the professional cyclists, there are some studies which

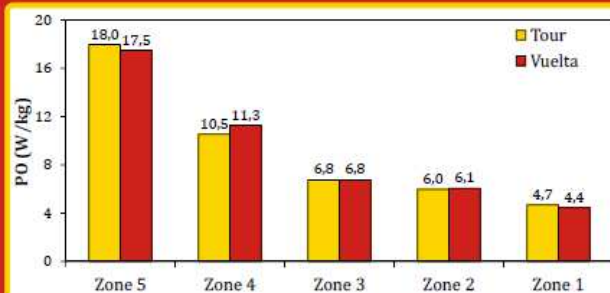
investigated power output (PO) during Grand Tour [3] but none has made PO measurement on a top-10 overall ranking cyclist to compare PO in different intensity zones in TdF and VaE. The purpose of this study was to compare the physical performance level between TdF and VaE of a top-10 overall ranking cyclist from PO measurements.

Methods

The PO data of a cyclist (23 yrs, 180 cm and 65 kg) who finished in the top-10 overall ranking in TdF 2012 (10th) and VaE 2013 (7th) were analysed to evaluate the physical performance level on each race from 1/ the determination of the Record Power Profile (RPP) of TdF and VaE according to the methodology of Pinot & Grappe [2] and 2/ the comparison of the maximal efforts in the five exercise intensity zones defined from the RPP.



| | 1" | 5" | 30" | 1' | 5' | 10' | 15' | 20' | 25' | 30' | 45' | 60' | 120' | 180' | 240' |
|--------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
| TOUR | 18,2 | 17,7 | 11,2 | 9,9 | 7,1 | 6,4 | 6,2 | 6,1 | 6,1 | 6,1 | 5,7 | 5,6 | 4,8 | 4,7 | 4,5 |
| VUELTA | 18,2 | 16,8 | 13,0 | 9,5 | 6,9 | 6,6 | 6,5 | 6,3 | 6,0 | 6,0 | 5,9 | 5,7 | 4,7 | 4,5 | 4,1 |



Results

The performance level in the low part of the severe intensity (zone 3) is similar in the two GT. In the heavy intensity (zone 2) there is a slight increase (+1.6%) of the performance level in VaE. The level of performance in moderate intensity (zone 1) and in force-velocity (zone 5) are higher in the TdF (5.1% and 2.6%, respectively) while it's the opposite in the high part of severe intensity (zone 4) (+6.9% in VaE).

Discussion

This study shows that the maximal efforts made between 5 and 60 min both in the TdF and VaE are very close in a top-10 overall ranking. This result means that the cyclist performed in the heavy and in the low part of the severe intensity zones at the same physical level of performance in the two GT although the characteristics of the roads were different (11 summit finishes & 36 km of individual time trials (ITT) in VaE 2013 vs. 4 summit finishes in TdF 2012, longer stages (+8%) and 100 km of ITT). The results are in accordance with the

specificity of the efforts performed between the maximal aerobic power (MAP) and the anaerobic threshold to get a ranking in the top 10 in a GT. Indeed, the general classification in a GT usually plays in mountain ascents and during ITT.

To achieve an overall ranking top 10 in a GT, the level of performance in the heavy and in the low part of the severe intensity zones is essential. To get there, the levels of both MAP and anaerobic threshold must be the highest possible.

References

- [1] Lucia, A., Hoyos, J., Santalla, A., Earnest, C., & Chicharro, J. L. (2003). Tour de France versus Vuelta a Espana: which is harder? *Med Sci Sports Exerc*, 35(5), 872-878.
 [2] Pinot, J., & Grappe, F. (2011). The record power profile to assess performance in elite cyclists. *Int J Sports Med*, 32(11), 839-844.
 [3] Vogt, S., Schumacher, Y. O., Roecker, K., Dickhuth, H. H., Schoberer, U., Schmid, A., & Heinrich, L. (2007). Power Output during the Tour de France. *Int J Sports Med*, 28(9), 756-761.