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

Présentée et soutenue publiquement à Besançon le 5 décembre 2014

Par **Julien PINOT**

Membres du Jury :

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

EA 4660 Culture - Sport - Santé - Société

« 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 bénéficié 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 ($P_{méca}$) 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 $P_{méca}$ 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 $P_{méca}$ 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 $P_{méca}$ 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 $P_{méca}$ 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 $P_{méca}$ 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 efficiente 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 mécaniques 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 35ème 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 36ème 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 14ème congrès de l'ACAPS à Rennes en 2011. 188

6. Communication orale au 15ème congrès de l'ACAPS à Grenoble en 2013. 190

7. Communication orale au 2ème 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. 35ème 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. *2ème 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. *36ème 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. 14ème *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. *3ème 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. 15ème *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* Tuaillon-Démesy 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* Tuaillon-Démesy 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* Tuaillon-Démesy 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)
- $P_{méca\text{-}4min}$, puissance mécanique moyenne du test 4 min (W)
- $P_{méca\text{-}cin}$, puissance mécanique cinétique du centre de masse (W)
- $P_{méca\text{-}CM}$, puissance mécanique du centre de masse (W)
- $P_{méca\text{-}cin}$, 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 ($m.sec^{-1}$)
- ✓ V_d, vitesse de déplacement ($m.sec^{-1}$)
- ✓ VMA, vitesse maximale aérobie (km/h)
- ✓ $\dot{V}O_2$: consommation d'oxygène ($mL.min^{-1}.kg^{-1}$)
- ✓ $\dot{V}O_{2max}$: consommation maximale d'oxygène ($mL.min^{-1}.kg^{-1}$)
- ✓ V_s, vitesse du vent soufflerie ($m.sec^{-1}$)
- ✓ V_v, vitesse du vent extérieur ($m.sec^{-1}$)
- ✓ 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)
- ✓ $W_{ext\text{-}capteur}$, 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)
- ✓ $\%_{VO2max}$, 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 Pcrit 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 VO2max 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 $\%_{VO2max}$ 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 $\%_{VMA}$ 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 critériums (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 $P_{méca}$ 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 $P_{méca}$ 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. 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 $P_{méca}$ 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 $P_{méca}$ 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 $P_{méca}$ – 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 $P_{méca}$ 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 adopté. 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 (1ère 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 ($P_{méca}$). L'intérêt de mesurer la $P_{méca}$ 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 $P_{méca}$ 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 $P_{méca}$ 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 $P_{méca}$ produite par un cycliste. La production de $P_{méca}$ 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.

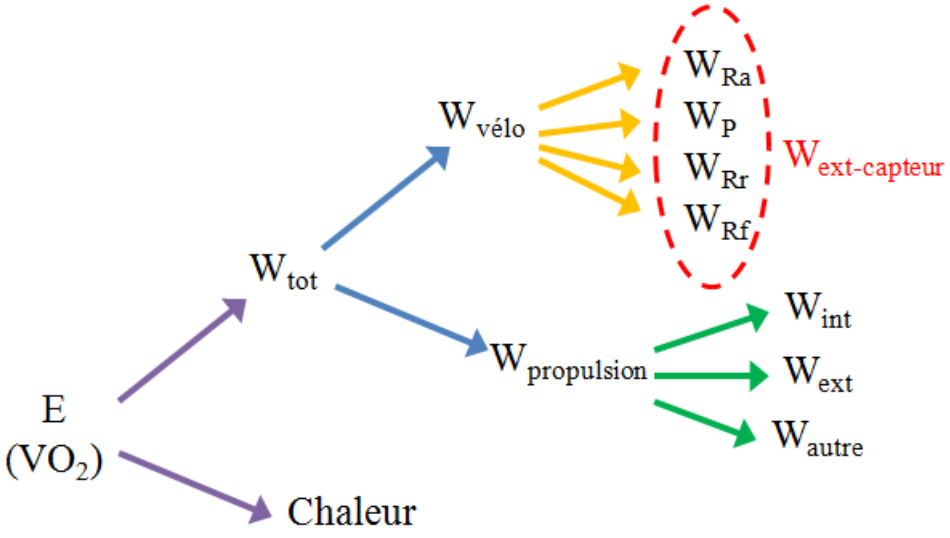


Figure 1 *Cascade de la dépense énergétique totale aux différentes formes de travail mécanique généré (adapté de Minetti, 2011)*

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 ($W_{propulsion}$).

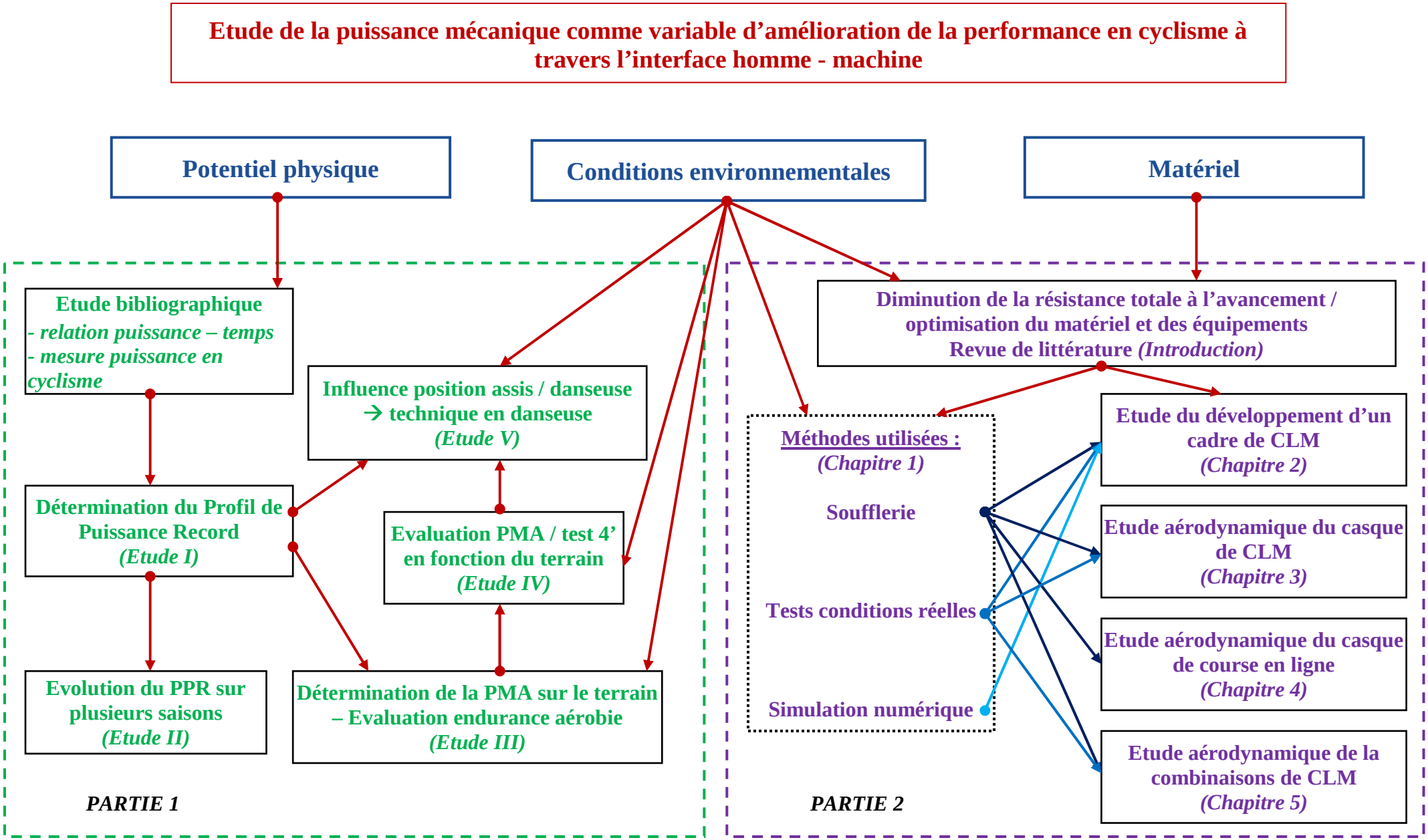
$W_{propulsion}$ concerne principalement le travail résultant des mouvements du centre de masse (W_{ext}) et le travail interne (W_{int}) correspondant à l'activité du système musculaire pour assurer la mobilisation des segments corporels. De plus, il convient de préciser qu'il existe également d'autres 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 ($W_{vélo}$). Ainsi, $W_{vélo}$ 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 ($W_{ext\text{-}capteur}$). Par conséquent, il est important de bien intégrer que la $P_{méca}$ 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. $W_{ext\text{-}capteur}$ 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 $P_{méca}$ ($W_{ext\text{-}capteur}$) et le temps sur des efforts intenses. En effet, l'étude de la relation $P_{méca}$ - 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 $P_{méca}$ les plus élevées comme des $P_{méca}$ 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 $P_{méca}$ 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 $P_{méca}$ 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 $P_{méca}$ par un cycliste, qui impactent la relation $P_{méca}$ 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 $P_{méca}$ 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 $W_{vélo}$ et $W_{propulsion}$ 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 $P_{méca}$ produite à partir de $W_{vélo}$. 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 $P_{méca}$ mesurée directement sur le vélo ($W_{ext-capteur}$) 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 $P_{méca}$ 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
Potentiel physique
Conditions environnementales
Matériel
Etude bibliographique
- relation puissance – temps
- mesure puissance en cyclisme
Influence position assis / danseuse
→ technique en danseuse
(Etude V)
Détermination du Profil de Puissance Record
(Etude I)
Evaluation PMA / test 4' en fonction du terrain
(Etude IV)
Evolution du PPR sur plusieurs saisons
(Etude II)
Détermination de la PMA sur le terrain – Evaluation endurance aérobie
(Etude III)
PARTIE 1
Diminution de la résistance totale à l'avancement / optimisation du matériel et des équipements
Revue de littérature (Introduction)
Méthodes utilisées :
(Chapitre 1)
Soufflerie
Tests conditions réelles
Simulation numérique
Etude du développement d'un cadre de CLM
(Chapitre 2)
Etude aérodynamique du casque de CLM
(Chapitre 3)
Etude aérodynamique du casque de course en ligne
(Chapitre 4)
Etude aérodynamique de la combinaisons de CLM
(Chapitre 5)
PARTIE 2

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 XXème 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 XXème 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 XXème 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 étudié 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.

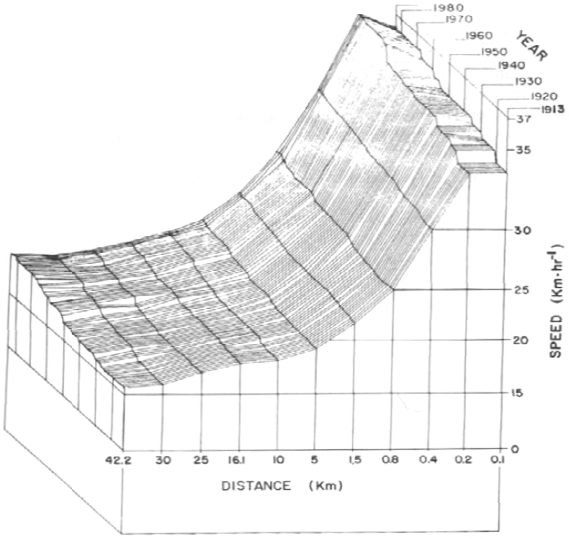


Figure 2 *Evolution des records du Monde en course à pied de 1913 à 1985, du 100 m au marathon (temps de chaque épreuve rapporté en vitesse moyenne) (Frederick, 1986)*

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 XXème siècle et les a superposés dans un graphique (figure 3) en reprenant les équations logarithmiques et exponentielles suivantes :

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

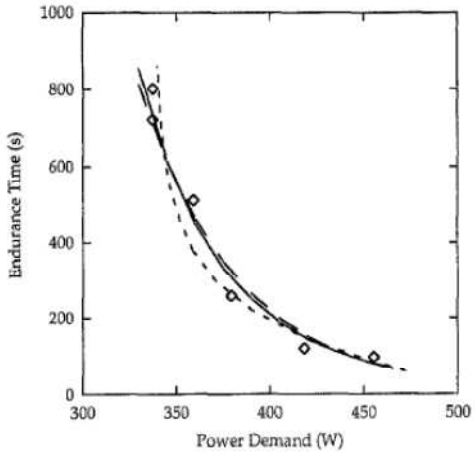


Figure 3 *Comparaison de 3 modèles mathématiques avec la puissance en abscisse à partir d'un cas concret (Grosse – Lordeman et Muller (trait plein), Bigland – Ritchie et Woods (grands pointillés) et Hopkins et coll (petits pointillés)) (Morton et Hodgson, 1996)*

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 :

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

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

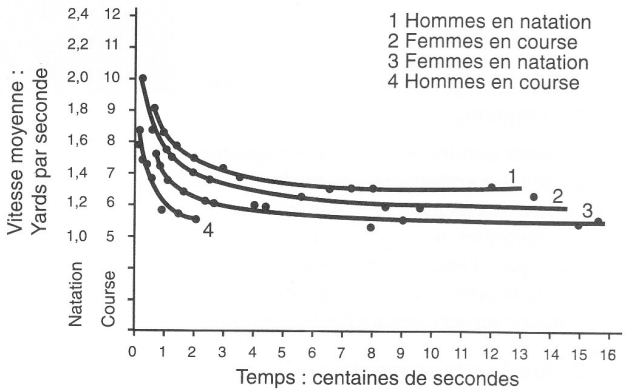


Figure 4 *Relation vitesse – temps en course à pied et en natation (Hill, 1927) (adapté par Billat, 2003)*

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 :

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

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 :

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

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.

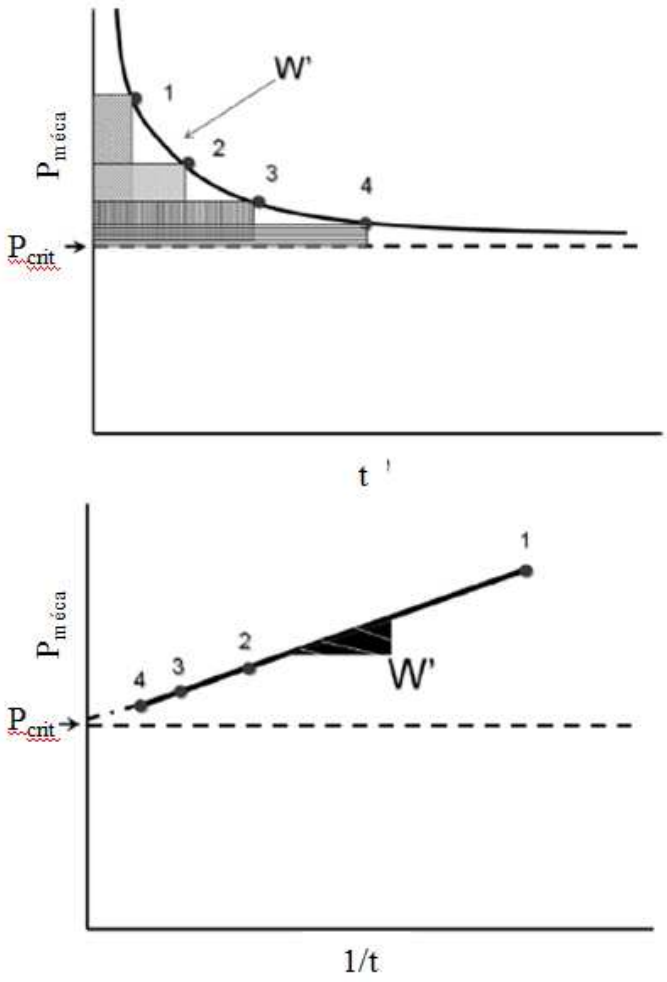


Figure 5 *En haut : illustration de la relation $P_{méca}$ – temps. Les chiffres 1 à 4 représentent les $P_{méca}$ atteintes en fonction des durées d'épuisement pour des tests indépendants. En bas : détermination de Pcrit et W' à partir de la relation $P_{méca}$ – 1/temps (adapté de Jones A. M. et al.,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

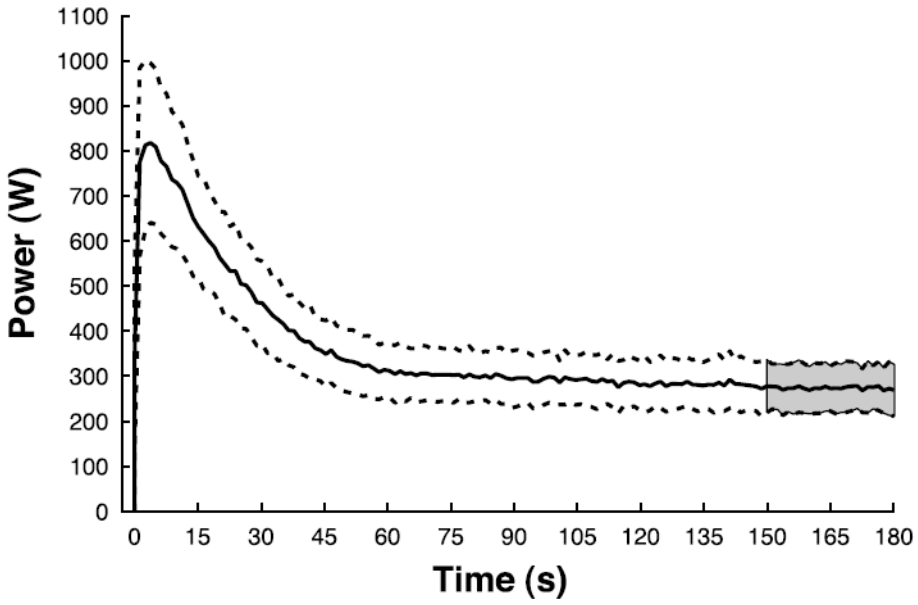


Figure 6 *Evolution de la $P_{méca}$ moyenne de 14 sujets sur un test « all-out » 3 min. La zone grisée correspond à la moyenne des 30 dernières secondes à partir desquelles la P_{crit} est déterminée (Francis J. T. et al., 2010)*

Bien que de nombreuses études se soient intéressés 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 musculation 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 aérobies 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 convient 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.

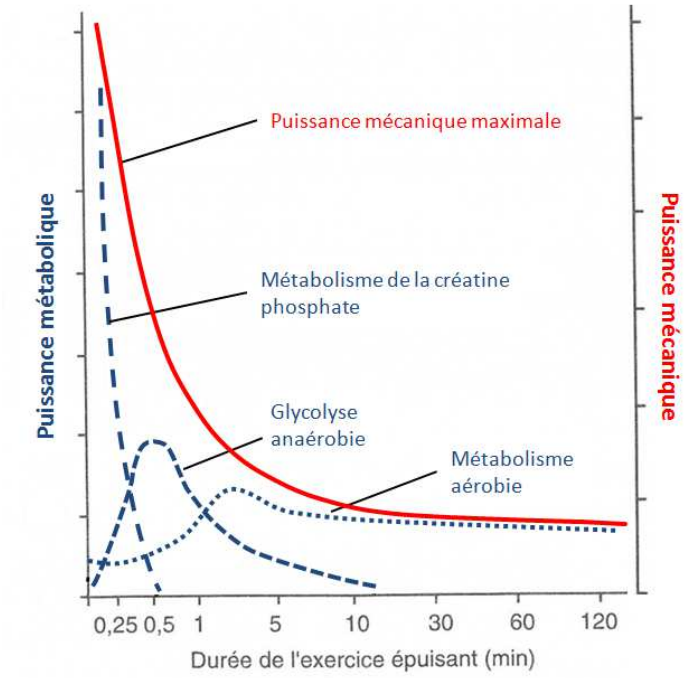


Figure 7 *Diminution de la $P_{méca}$ maximale expliquée par rapport à la part de production énergétiques des différents métabolismes (adapté de la courbe d'Howald)*

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.

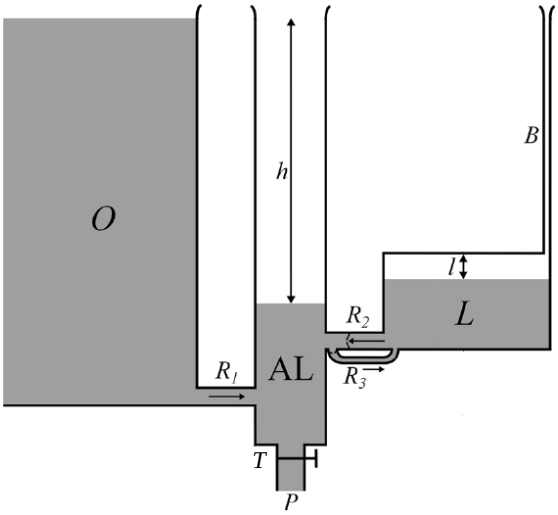


Figure 8 *le modèle hydraulique à 3 composantes de Morton (adapté de Sundström et al. (2014))*

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 R_1 et R_2, puis à travers R_1 et R_3 mais très lentement jusqu'à ce que *AL* retrouve son niveau de repos. Ce remplissage correspond au remboursement de la dette d'oxygène. Comme R_3 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 $\dot{V}O_{2max}$ ($\%_{VO2max}$) 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 $\%_{VO2max}$ 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 $\%_{VO2max}$ 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 :

- Coureurs amateurs : $\%_{VO2max} = 0{,}905 - 0{,}00091 \cdot t$ (7)
- Athlètes féminines : $\%_{VO2max} = 1{,}00 - 0{,}050 \cdot \log(0{,}14 \cdot t)$ (8)
- Athlètes masculins : $\%_{VO2max} = 1{,}00 - 0{,}056 \cdot \log(0{,}14 \cdot t)$ (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 :

- $\%_{VO2max} = 0{,}940 - 0{,}001 * t$ (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 :

- Si $t < 4.6$ min : $\text{Iog}\ \%_{VO2max} = 4.93 - 0.186 \log t$ (11)
- Si $4.6 < t < 70.4$ min : $\text{Iog}\ \%_{VO2max} = 4.79 - 0.096 \log t$ (12)
- Si $70.4 < t < 173.7$ min : $\text{Iog}\ \%_{VO2max} = 4.90 - 0.121 \log t$ (13)
- Si $t > 173.7$ min : $\text{Iog}\ \%_{VO2max} = 5.08 - 0.156 \log t$ (14)

Ils ont également proposé une autre équation standard :

- $\%_{VO2max} = 126.69 - 11.056\ \text{Iog}\ t$ (15)

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

- $\%_{VO2max} = 109.837\ \text{Iog}\ t^{-0.202}$ (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 $\dot{V}O_{2max}$ selon Di Prampero, alors que Léger prédirait une fraction de 77%...

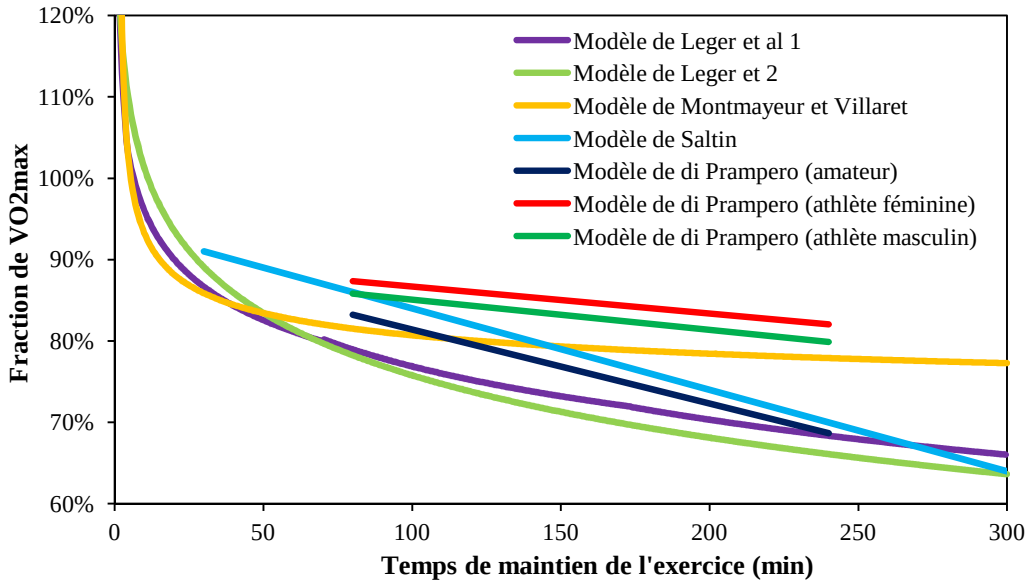


Figure 9 *Comparaison des différentes modélisations d'évolution de la fraction de $\dot{V}O_{2max}$ soutenue selon le temps d'exercice (d'après les données de Léger et al. (1986), de Montmayeur et Villaret (1990), de Saltin (1973) et de di Prampero (1986))*

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 $\%_{VO2max}$ 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 $\%_{VO2max}$ 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 $\%_{VO2max}$. 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).

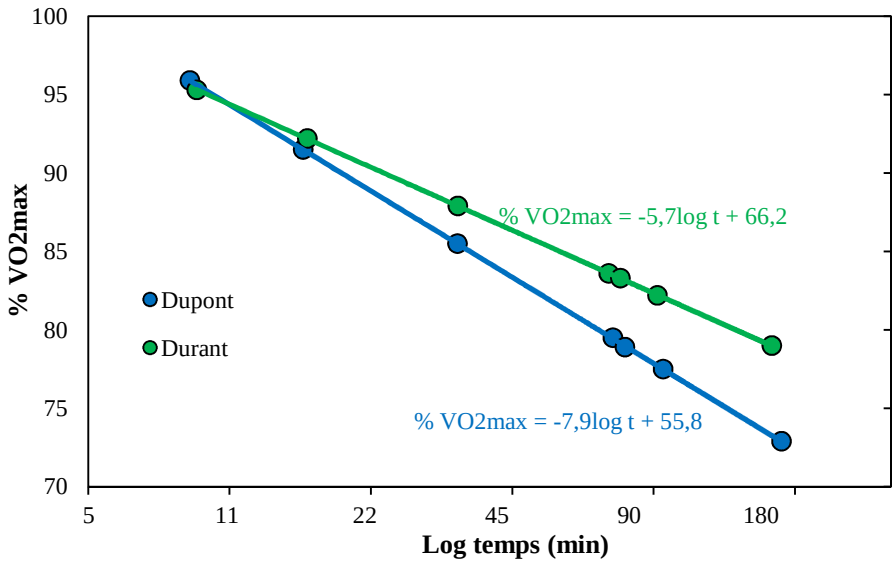


Figure 10 *Illustration graphique et mathématique de l'évaluation de l'indice d'endurance de deux athlètes (Durant et Dupont) à partir de plusieurs performances réalisées en course à pied dont les* $\%_{VO2max}$ *équivalents ont été estimés. Dans cet exemple, Durant a une capacité d'endurance plus élevée (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).

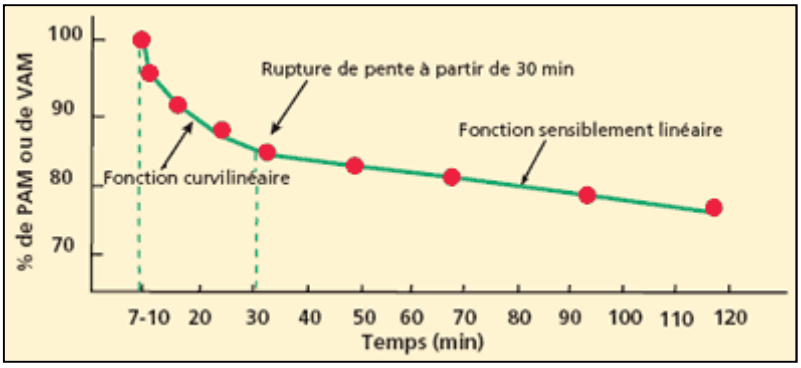


Figure 11 *Décroissance de la durée limite maintenue en fonction du* $\%_{VMA}$ *utilisée (Cazorla, 2001)*

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 $\dot{V}O_{2max}$ 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.

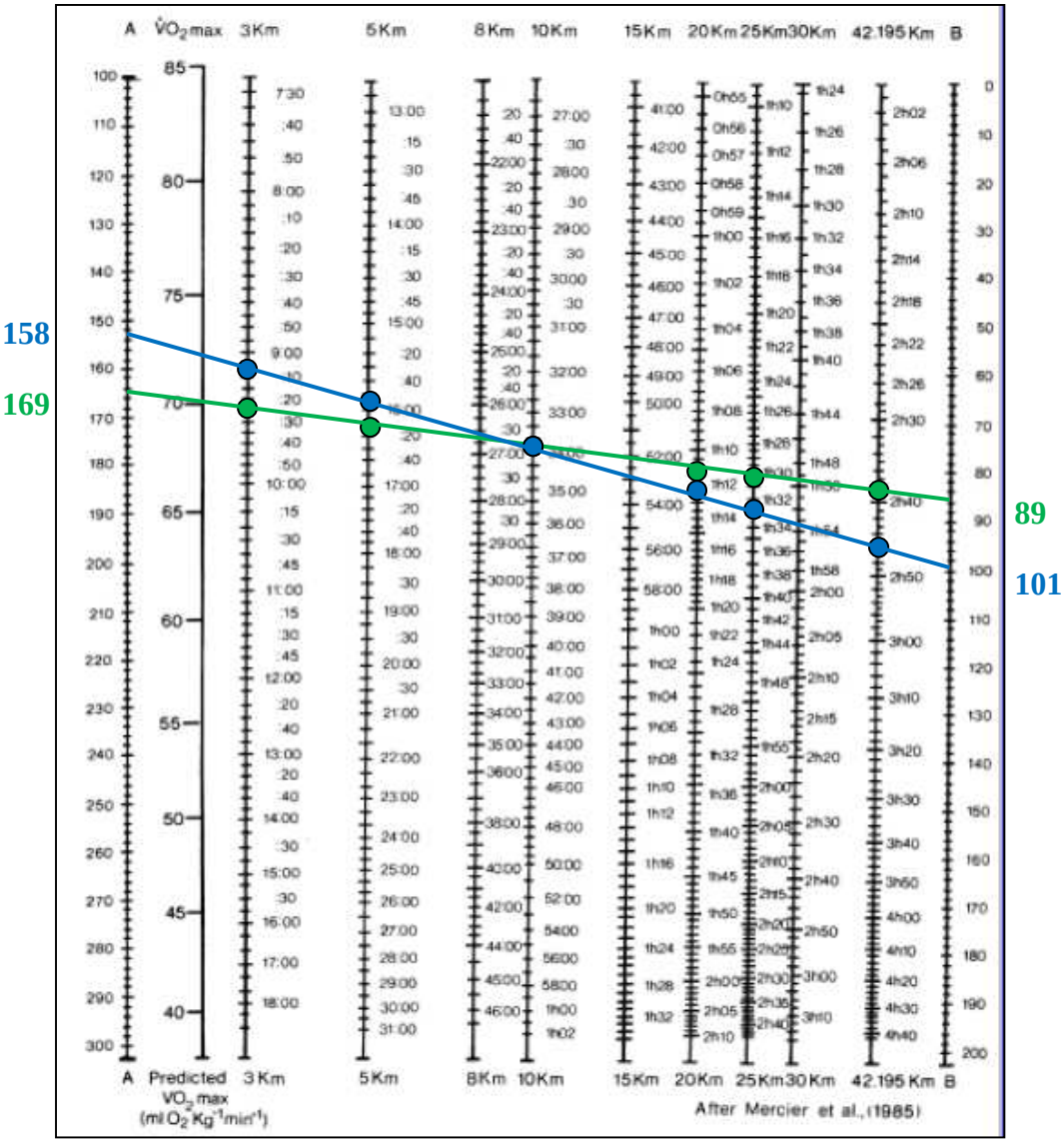


Figure 12 *Nomogramme de Mercier et al. (1984). Exemple de calcul de l'IE de Dupont (bleu) et Durant (vert) à partir de performances réalisées en course à pied (IE = indice A – indice B). Durant a une capacité d'endurance plus élevée (IE : 169-89=80) que Dupont (158-101=57). Exemple d'après les mêmes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

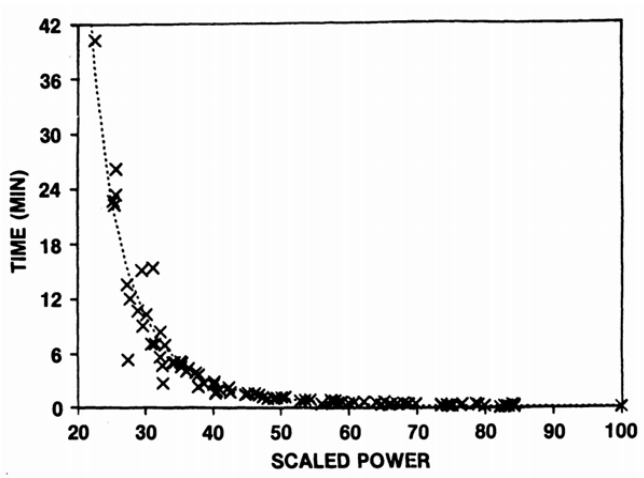


Figure 13 *Modélisation de la relation temps – %P_{max} obtenue à partir d'essais en laboratoire avec des cyclistes (Harman et al., 1987)*

Coggan a démocratisé la relation $P_{méca}$ – 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 $P_{méca}$ 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 $P_{méca}$ 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 $P_{méca}$ 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 $P_{méca}$ 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 $P_{méca}$ 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 $P_{méca}$ – temps en les hiérarchisant.

Tableau 1 *Tableau de Coggan classifiant le niveau d'un coureur en fonction de la relation $P_{méca}$ – 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.g., international pro)	24,04	11,50	7,60	6,40	19,42	9,23	6,61	5,63
	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
Exceptional (e.g., domestic pro)	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
	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
Excellent (e.g., cat. 1)	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
	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
Very good (e.g., cat. 2)	18,87	[illegible]	5,64	4,71	15,32	7,57	4,85	4,13
	18,60	9,20	5,53	4,62	15,11	7,48	4,76	4,05
	18,33	[illegible]	5,43	4,53	14,89	7,39	[illegible]	[illegible]
	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	[illegible]	[illegible]
	17,51	8,74	5,12	4,27	14,25	7,11	4,39	3,72
	17,24	8,63	5,01	4,18	14,03	7,02	4,30	3,64
Good (e.g., cat. 3)	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
Moderate (e.g., cat. 4)	14,79	7,59	4,08	3,38	12,09	6,21	3,46	2,90
	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
Fair (e.g., cat. 5)	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
	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
Untrained (e.g., non-racer)	12,08	6,44	3,05	2,49	9,94	5,30	2,54	2,08
	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 $P_{méca}$ – 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).

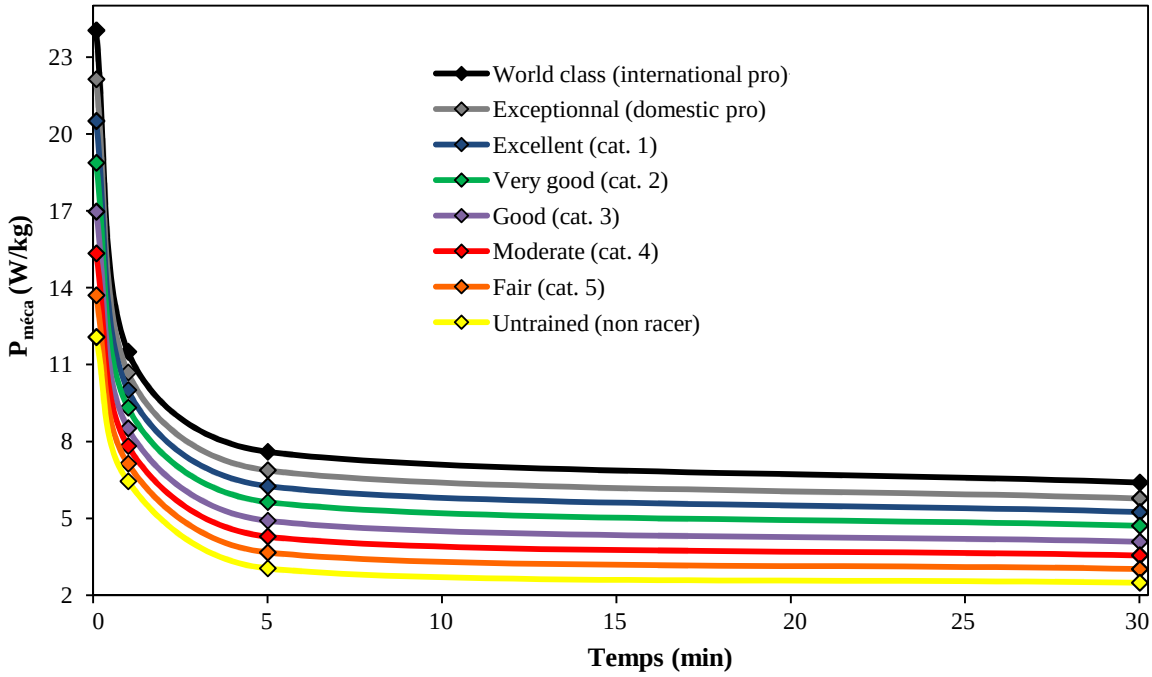


Figure 14 *Relation $P_{méca}$ - temps adaptée à partir du tableau de Coggan (pour des athlètes masculins) (Allen et Coggan, 2010)*

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 $P_{méca}$ obtenues sur des compétitions de haut niveau, plusieurs d'entre elles rapportent des valeurs de $P_{méca}$ 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 $P_{méca}$ – temps obtenue en fonction du profil des étapes (figure 15). Les résultats permettent d'établir une relation $P_{méca}$ – 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 $P_{méca}$ 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 $P_{méca}$ sur des efforts plus longs sont supérieures étant donné que le niveau de $P_{méca}$ est plus important et constant dans les cols.

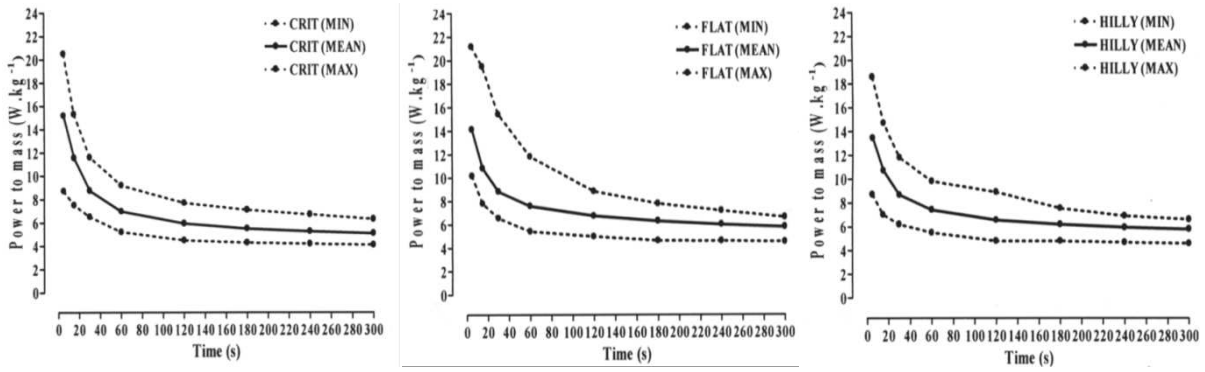


Figure 15 *Relations $P_{méca}$ – temps pour des critériums (CRIT), étapes plates (FLAT) et étapes montagneuses (HILLY) d'une course à étapes (Ebert et al., 2006)*

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

Tableau 3 *Pics de $P_{méca}$ 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)*

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 $P_{méca}$ – 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 $P_{méca}$ 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 $P_{méca}$ 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.

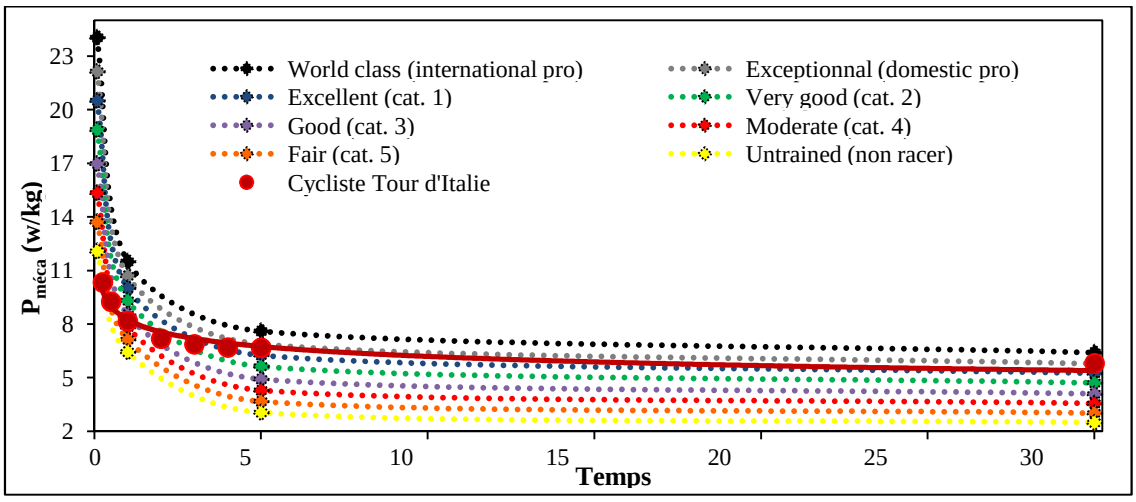


Figure 16 *Relation $P_{méca}$ – temps (en rouge foncé) d'un cycliste lors du Tour d'Italie par rapport aux niveaux définis par Allen et Coggan (2010) à partir des records de puissance maximale développés sur cette course à étapes, d'après les données de Vogt et al. (2007)*

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 5ème et la 10ème 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.

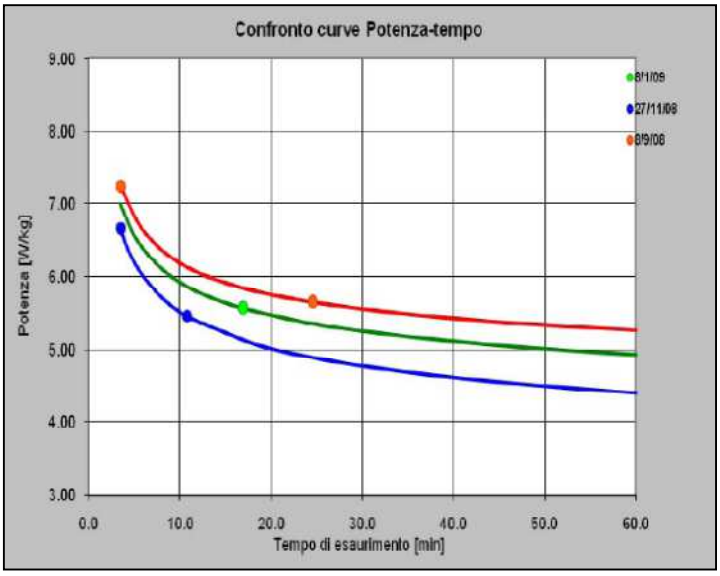


Figure 17 *Evolution de la courbe $P_{méca}$ - temps d'un cycliste à partir d'un test de tlim (Sassi, mapeisport.it/ivanbasso)*

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).

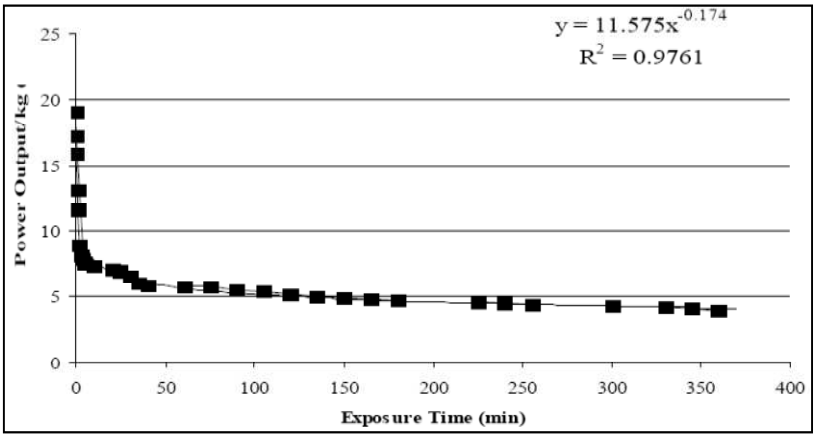


Figure 18 *Relation $P_{méca}$ - temps de maintien à partir du suivi de 5 cyclistes professionnels (Larrazabal et al., 2006)*

Villerius 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).

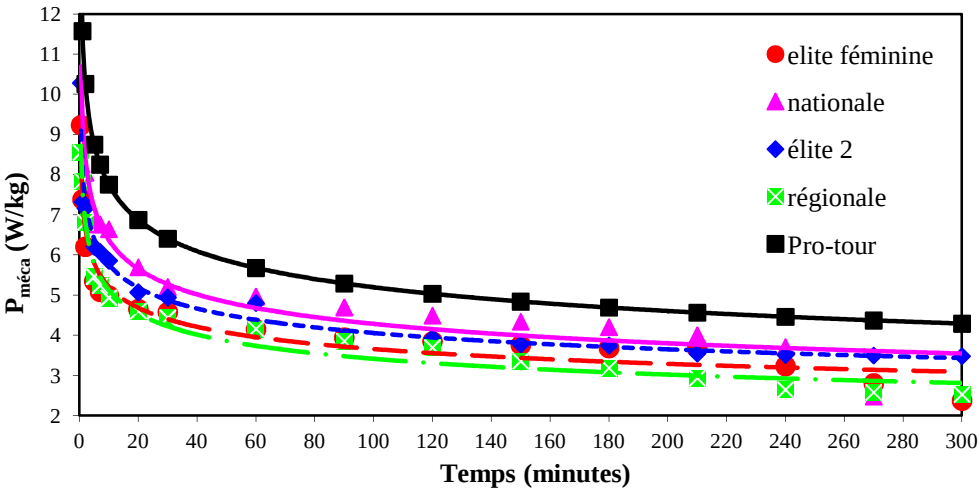


Figure 19 *Profil de puissance de 5 cyclistes de différents niveaux (Villerius et al., 2007)*

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 :

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

Où ρ est dans la densité de l'air, SCx est la surface frontale effective, Vd est la vitesse du cycliste, Vv 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, Cr est le coefficient de résistance au roulement, g est la gravité, cos α est l'angle de la pente et Fb 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 $P_{méca}$ 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 $P_{méca}$, 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 $P_{méca}$ 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 $P_{méca}$ 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 $P_{méca}$ 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 $P_{méca}$ 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 $P_{méca}$ 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 $P_{méca}$ est calculée *via* l'équation 18 :

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

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 $P_{méca}$ 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.

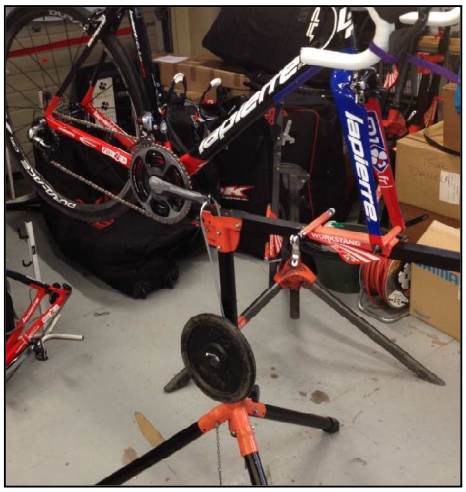


Figure 23 *Etalonnage par une méthode statique du pédalier SRM*

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 $P_{méca}$ 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 $P_{méca}$ 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 $P_{méca}$ *via* un système embarqué sur le vélo, il apparaît possible d'analyser rationnellement le potentiel physique du cycliste.

Toutefois, il semble que la $P_{méca}$ 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 $P_{méca}$ 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 ($W_{propulsion}$) 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 $P_{méca}$ produits par le cycliste en montée.

L'objectif de la première partie de la thèse a été d'étudier la relation $P_{méca}$ – temps du cycliste à partir de mesures directes de la $P_{méca}$ 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 $P_{méca}$ records – temps, défini comme le Profil de Puissance Record (PPR), et comment ce dernier présente des intérêts dans le processus de suivi de l'entrainement. 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 $P_{méca}$ et 2) de la technique en danseuse sur la production de $P_{méca}$, 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 $P_{méca}$.

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 $P_{méca}$ 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 – vélocité : $P_{méca}$ 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.

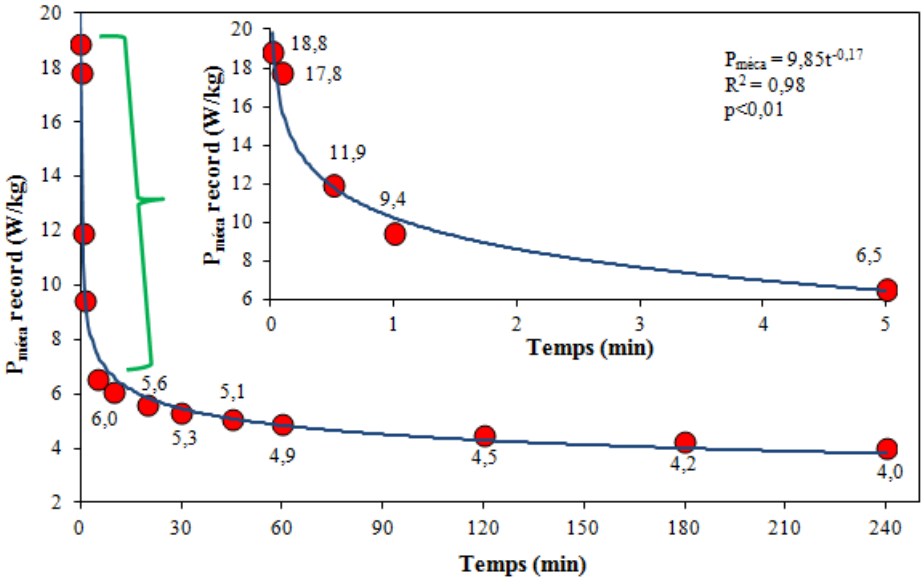


Figure 25 *PPR moyen des 17 cyclistes*

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 Departement Santé et Sports, Equipe Culture – Sport – Santé – Société (C3S) UPFR-Sports, 31 chemin de l'épitaphe, Besancon, 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 VO_2max 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
Departement Santé et Sports
Equipe Culture –
Sport – Santé – Société (C3S)
UPFR-Sports
31 chemin de l'épitaphe
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 (+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, Peaksware, 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 ± 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'	10'	20'	30'	45'	60'	120'	180'	240'
(W)	1258[a]±165	1181[a]±144	793[a]±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	8.7	8.6	8.8	7.8	7.4	6.1	7.5	7.8
(W)	[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	6.4	6.0	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–i–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 [mininimum–maximum], [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 b 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)

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

The changes in record PO between the cyclists are different according to the time: the most important difference is 8.9 W.kg^{-1} for 1 s whereas it is only 1.2 W.kg^{-1} for 4 h. 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 ($R^2=0.99$, $p<0.001$) 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 5 min and 1 h (respectively 6.6 W/kg *vs.* 6.5 W/kg for 5 min, 6.2 W/kg *vs.* 5.9 W/kg for 10 min, 5.7 W/kg *vs.* 5.5 W/kg for 20 min, 5.4 W/kg *vs.* 5.2 W/kg for 30 min, 5.1 W/kg *vs.* 5.0 W/kg for 45 min, 5.0 W/kg *vs.* 4.8 W/kg for 60 min duration).

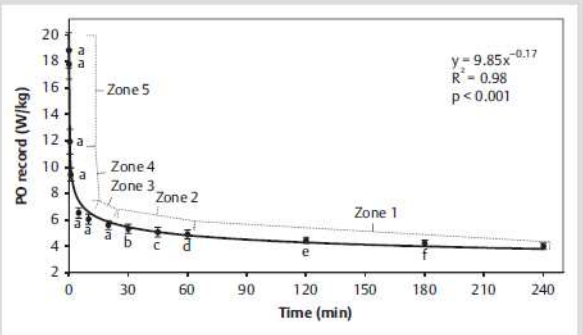


Fig. 1 Average RPP of the 17 cyclists.
[a] significant difference between all record PO ($p<0.05$),
[b] significant difference between all record PO except for 45' ($p<0.05$),
[c] significant difference between all record PO except for 60' ($p<0.05$),
[d] significant difference between all record PO 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**).

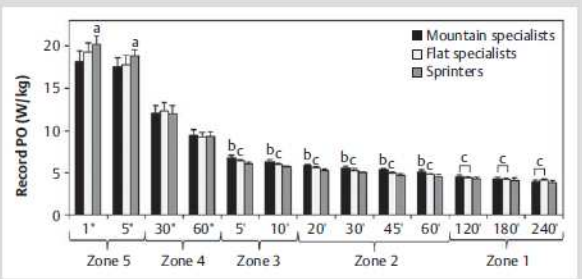


Fig. 2 RPP according to the cyclist's skills and exercise intensity zones. [a] significant difference between climbers and flat specialists ($p<0.05$), [b] significant difference between sprinters and flat specialists ($p<0.05$), [c] significant difference with sprinters ($p<0.05$).

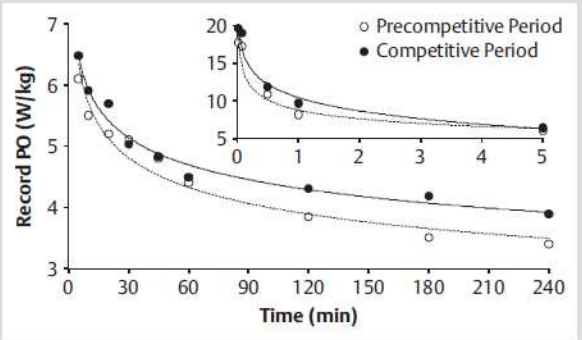


Fig. 3 Changes in cyclist's RPP between the pre-competitive period (December to March) and the competitive period (March to September) on time durations between 1 s–5 min (top panel) and between 5 min–4 h (bottom panel).

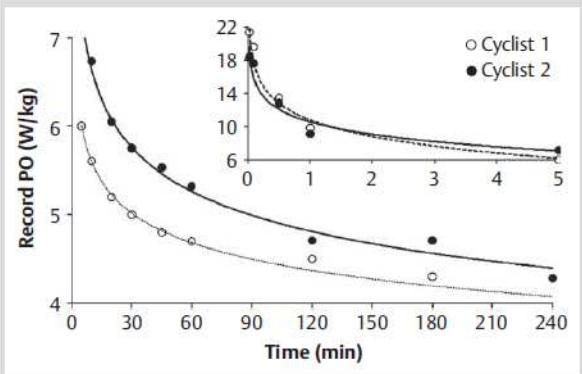


Fig. 4 Comparison of the RPP of 2 cyclists on time durations between 1 s–5 min (top panel) and between 5 min–4 h (bottom panel).

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: $PO = 9.85.t^{-0.17}$ ($R^2 = 0.98$). This equation models the power profile for a large and heterogeneous population of cyclists. Larrazabal et al. (2006, unpublished observations) found a similar equation ($PO = 11.58.t^{-0.17}$, $R^2 = 0.97$) 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: $PO = a.t^{-0.17}$. 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 W.kg^{-1} and 6.9 W.kg^{-1} with Larrazabal's equation *vs.* 20.1 W.kg^{-1} and 5.8 W.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 W/kg, 7.8 W/kg and 6.4 W/kg, 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 $W.kg^{-1}$). 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, Menaspa 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).

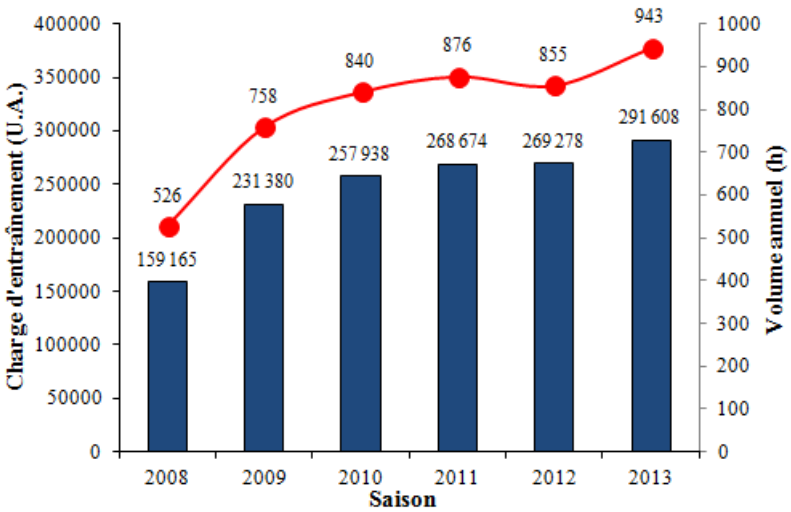


Figure 26 *Evolution de la charge d'entraînement annuel (bleu) et volume total (rouge)*

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.

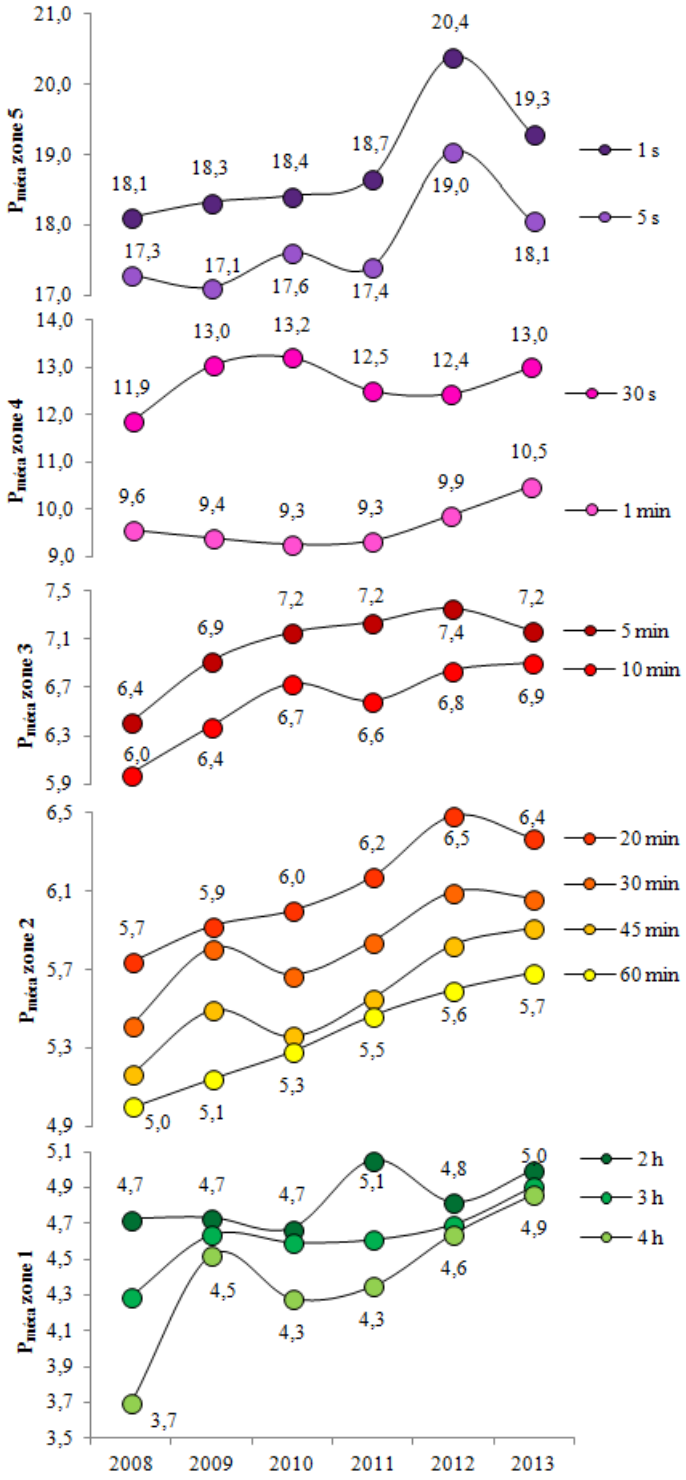


Figure 27 *Evolution des $P_{méca}$ records à l'intérieur des 5 zones d'intensité au cours des 6 saisons*

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 $P_{méca}$ 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 $P_{méca}$ 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 $P_{méca}$ records sur des durées comprises entre 5 min et 1h le confirment. Les valeurs de $P_{méca}$ 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 $P_{méca}$ 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 $P_{méca}$ 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 confirme 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.

Journal of Sports Sciences, 2014
http://dx.doi.org/10.1080/02640414.2014.969296

Routledge
Taylor & Francis Group

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

JULIEN PINOT[1,2] & FREDERIC GRAPPE[1,2]

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

Correspondence: Julien Pinot, Health & Sport Department, University of Franche-Comte, EA 4660, Culture – Sport – Health – Society (C3S), Besancon, France. E-mail: julienpinot@laposte.net

© 2014 Taylor & Francis

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 L · min^{-1} (85 mL · min^{-1} · kg^{-1}) according to an incremental test performed in a medical centre. The ramp test (25 W · 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) (Wooles, 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, Peaksware, 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 ($W \cdot kg^{-1}$) 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 ± 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

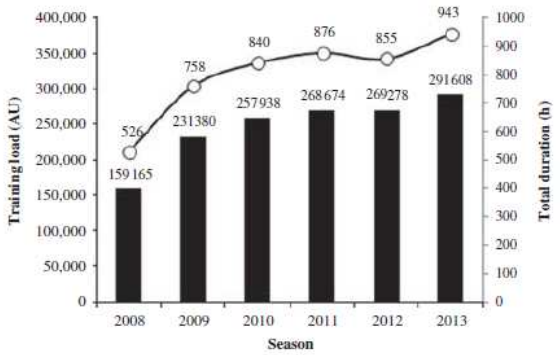


Figure 1. Changes in the annual training load (black bar) and total duration (white circle) (AU: Arbitrary Unit).

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 · kg^{-1}, whereas the record PO on 1 min peaked at 10.5 W · 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 · 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 ± SD (CV) (AU: Arbitrary Unit).

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

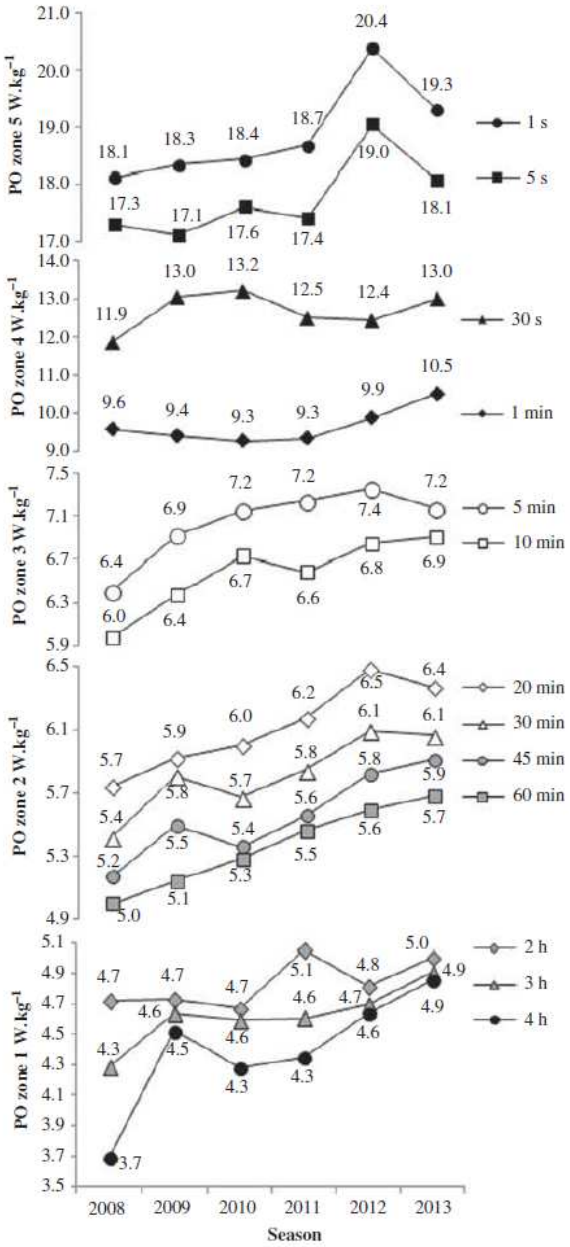


Figure 2. Changes in the different record power outputs (PO) throughout the six competitive seasons within the five exercise intensity zones.

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, Mognoni, and Impellizzeri (2006) and Lamberts, Rietjens, Tijdink, 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 $W \cdot kg^{-1}$ and 1.1 $W \cdot kg^{-1}$, 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 $W \cdot kg^{-1}$ on 30 s and 10.5 $W \cdot kg^{-1}$ 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 $W \cdot kg^{-1}$ on 5 min, 6.5 $W \cdot kg^{-1}$ on 20 min, 6.1 $W \cdot kg^{-1}$ on 30 min and 5.7 $W \cdot kg^{-1}$ 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, Wpeak 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/japplphysiol.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., Earnest, 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