



HAL
open science

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

Julien Pinot

► **To cite this version:**

Julien Pinot. Etude de la puissance mécanique comme variable d'amélioration de la performance en cyclisme à travers l'interface homme-machine. Education. Université de Franche-Comté, 2014. Français. NNT : 2014BESA1007 . tel-02428889

HAL Id: tel-02428889

<https://theses.hal.science/tel-02428889v1>

Submitted on 6 Jan 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

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 :

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

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

REMERCIEMENTS

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Résumé

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

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

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

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

Abstract

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

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

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

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

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

TABLE DES MATIERES

Résumé	9
Abstract	11
TABLE DES MATIERES	13
LISTE DES PUBLICATIONS.....	19
LISTE DES ABREVIATIONS	23
TABLE DES FIGURES	25
LISTE DES TABLEAUX.....	35
INTRODUCTION GENERALE	39
Contexte	41
Introduction	43
Structuration de la thèse	49
PARTIE 1 : EVALUATION DU POTENTIEL PHYSIQUE	50
CHAPITRE 1 : Etude bibliographique.....	51
1. Etude de la relation intensité – temps.....	51
1.1. Modèles empiriques	51
1.2. Modèles bioénergétiques.....	53
1.2.1. Concept de la puissance critique	54
1.2.2. Limites du modèle hyperbolique de la P_{crit}	59
1.2.3. Autres modèles bioénergétiques.....	60
1.2.4. Evaluation de l'endurance	65
2. Applications de la relation intensité – temps dans le cyclisme	72
2.1. Relation intensité – temps en cyclisme	72
2.2. Mesure de la $P_{méca}$ en cyclisme	80
3. Synthèse et objectifs de travail.....	85
CHAPITRE 2 : Etude I : Détermination du Profil de Puissance Record	89

Résumé détaillé	89
CHAPITRE 3 : Suivi longitudinal du PPR	99
Résumé détaillé	99
CHAPITRE 4 : Détermination d'une méthode d'évaluation de la PMA et de l'endurance aérobie en cyclisme sur le terrain	113
Résumé détaillé	113
CHAPITRE 5 : Influence des conditions et de la nature du terrain sur la $P_{méca}$ produite lors d'un test maximal sur 4 minutes	125
Résumé détaillé	125
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	139
Résumé détaillé	139
DISCUSSION	157
PARTIE 2 : OPTIMISATION DE L'INTERFACE HOMME - MACHINE	169
INTRODUCTION.....	172
1. La traînée aérodynamique	174
1.1. Définition	174
1.2. Variables de la traînée aérodynamique	177
2. Résistances dues au roulement et aux frictions mécaniques	178
2.1 Résistance au roulement.....	178
2.2. Résistances dues aux frictions mécaniques	179
3. Méthodes de mesure des résistances aérodynamiques	179
3.1 La soufflerie	180
3.2 Mesure de la $P_{méca}$ en condition réelle de locomotion.....	181
3.2.1 Méthode d'analyse de régression linéaire	181
3.2.2 Modèle mathématique	182
3.3 Mesure de dynamométrie	183

3.4 Méthode de décélération	184
3.5 Mesure de la surface frontale	185
3.5.1 Pesée des photographies.....	185
3.5.2 Planimétrie	185
3.5.3 Digitalisation	185
3.6 Modélisation numérique de la mécanique des fluides (CFD).....	186
4. Etudes aérodynamiques des différents composants du système cycliste - vélo.....	188
4.1 Equipements	189
4.2 Matériel	194
5. Synthèse et objectifs de travail.....	198
CHAPITRE 1 : Méthodologies utilisées	201
1. Soufflerie	201
1.1. Généralités.....	201
1.2. Elaboration d'un mannequin	204
1.3. Visualisation des écoulements pariétaux.....	208
1.4. Visualisation dans le volume d'écoulement avec fil de laine	209
1.5. Mesure du SC_x	211
1.6. Protocole expérimental.....	211
1.7. Analyse des résultats	215
2. Tests en conditions réelles de locomotion sur vélodrome.....	217
2.1. Le vélodrome.....	217
2.2. Protocole expérimental.....	217
2.3. Analyse des résultats	218
3. Modélisation numérique de la mécanique des fluides (CFD)	220
3.1. Démarche méthodologique.....	220
3.2. Méthodologie utilisée	225
3.3. Analyse des résultats	226

CHAPITRE 2 : Etude du développement d'un cadre de CLM	229
1. Etude comparative de trois cadres de CLM en soufflerie	230
2. Etude comparative des cadre de CLM Lapierre et Specialized avec utilisation du mannequin	234
3. Etude CFD comparative de 3 cadres de CLM.....	236
4. Etude CFD du développement du cadre Lapierre Aerostorm	240
5. Validation en soufflerie du cadre Aerostorm 2013 avec mannequin	249
6. Validation du cadre de CLM Aerostorm sur vélodrome.....	256
7. Nouvel essai de validation en soufflerie du cadre Lapierre Aerostorm	259
8. Validation du kit bidon – porte bidon de CLM Elite	261
9. Conclusion.....	263
CHAPITRE 3 : Etude aérodynamique de casques de CLM.....	265
1. Essais du casque de CLM Uvex Race 4	265
2. Validation du casque de CLM Uvex Race 6	272
2.1. Essais en soufflerie.....	273
2.2. Essais sur vélodrome	276
3. Comparaison en soufflerie de casques de CLM.....	280
4. Conclusion.....	284
CHAPITRE 4 : Etude aérodynamique de casques de course en ligne	285
1. Essai du casque aérodynamique Uvex FP5	286
2. Validation du modèle aérodynamique du casque Uvex FP5.....	289
3. Optimisation du modèle aérodynamique du casque Alpina Elexxion	293
4. Conclusion.....	299
CHAPITRE 5 : Etude aérodynamique sur les combinaisons de CLM	301
1. Etude comparative en soufflerie de combinaisons de CLM Moa	302
2. Etude comparative en soufflerie de combinaisons de CLM de marques concurrentes	304

3. Etude de l'influence de modifications de la surface du mannequin sur la traînée aérodynamique	306
4. Test expérimental sur vélodrome visant à diminuer la traînée des bras.....	314
5. Etude comparative sur vélodrome entre la combinaison Moa et une combinaison B'twin (2013)	318
6. Etude comparative en soufflerie de combinaisons Moa et B'twin.....	321
7. Etude en soufflerie de l'influence sur la traînée aérodynamique de différents textiles selon leur emplacement sur le corps du mannequin.....	326
8. Validation en soufflerie de la combinaison prototype B'twin	331
9. Conclusion.....	334
DISCUSSION	335
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	339
BIBLIOGRAPHIE	343
ANNEXES.....	359
1. Co-auteur d'un article publié dans la revue internationale Journal of Science and Cycling.	361
2. Lettre aux éditeurs publiée dans la revue internationale International Journal of Sport Medicine	369
3. Communication orale au 35 ^{ème} congrès de la Société de Biomécanique au Mans en 2010, ayant fait l'œuvre d'un article dans le supplément de la revue internationale Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering	370
4. Communication orale au 36 ^{ème} congrès de la Société de Biomécanique à Besançon en 2011, ayant fait l'œuvre d'un article dans le supplément de la revue internationale Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering	372
5. Communication orale au 14 ^{ème} congrès de l'ACAPS à Rennes en 2011.....	374
6. Communication orale au 15 ^{ème} congrès de l'ACAPS à Grenoble en 2013.....	376
7. Communication orale au 2 ^{ème} World Congress of Cycling Science à Leeds en 2014, ayant fait l'œuvre d'un article dans le supplément de la revue internationale Journal of Science and Cycling	378

LISTE DES PUBLICATIONS

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

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

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

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

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

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

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

Communications orales :

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

Communications affichées :

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

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

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

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

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

LISTE DES ABREVIATIONS

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

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

TABLE DES FIGURES

Figure 1 Cascade de la dépense énergétique totale aux différentes formes de travail mécanique généré (adapté de Minetti, 2011)	45
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)	52
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).....	53
Figure 4 Relation vitesse – temps en course à pied et en natation (Hill A., 1927) (adapté par Billat, 2003).....	54
Figure 5 En haut : illustration de la relation $P_{méca}$ – temps. Les chiffres 1 à 4 représentent les $P_{méca}$ atteintes en fonction des durées d'épuisement pour des tests indépendants. En bas : détermination de P_{crit} et W' à partir de la relation $P_{méca}$ – 1/temps (adapté de Jones A. M. et al., 2009).....	56
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).....	58
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)	62
Figure 8 le modèle hydraulique à 3 composantes de Morton (adapté de Sundström et al. (2014)).....	63
Figure 9 Comparaison des différentes modélisations d'évolution de la fraction de VO_{2max} soutenue selon le temps d'exercice (d'après les données de Léger et al. (1986), de Montmayeur et Villaret (1990), de Saltin (1973) et de di Prampero (1986))	68
Figure 10 Illustration graphique et mathématique de l'évaluation de l'indice d'endurance de deux athlètes (Durant et Dupont) à partir de plusieurs performances réalisées en course à pied dont les $\%VO_{2max}$ équivalents ont été estimés. Dans cet exemple, Durant a une capacité d'endurance plus élevée (IE : -5,7) que Dupont (IE : -7,9) (adapté de Peronnet et Thibault, 1984).....	69

Figure 11 Décroissance de la durée limite maintenue en fonction du % V_{MA} utilisée (Cazorla, 2001).....	69
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).	70
Figure 13 Modélisation de la relation temps – % P_{max} obtenue à partir d'essais en laboratoire avec des cyclistes (Harman et al., 1987)	72
Figure 14 Relation $P_{méca}$ - temps adaptée à partir du tableau de Coggan (pour des athlètes masculins) (Allen et Coggan, 2010).....	75
Figure 15 Relations $P_{méca}$ – temps pour des critères (CRIT), étapes plates (FLAT) et étapes montagneuses (HILLY) d'une course à étapes (Ebert et al., 2006)	76
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)....	77
Figure 17 Evolution de la courbe $P_{méca}$ - temps d'un cycliste à partir d'un test de tlim (Sassi, mapeisport.it/ivanbasso).....	78
Figure 18 Relation $P_{méca}$ - temps de maintien à partir du suivi de 5 cyclistes professionnels (Larrazabal et al., 2006)	79
Figure 19 Profil de puissance de 5 cyclistes de différents niveaux (Villierius et al., 2007)	79
Figure 20 Cyclo-ergomètre avec système de réglage de la $P_{méca}$ à partir d'un freinage mécanique par courroie (Monark, modèle 874E).....	81
Figure 21 Cyclo-ergomètre avec système de réglage de la $P_{méca}$ à partir d'un freinage électromagnétique (Lode Excalibur)	81
Figure 22 Système SRM avec le pédalier (contenant les jauges de contraintes) et le compteur, (Powercontrol) récepteur et afficheur des données	83
Figure 23 Etalonnage par une méthode statique du pédalier SRM	83
Figure 24 Capteur de puissance Powertap avec le système de mesure à l'intérieur du moyeu	84
Figure 25 PPR moyen des 17 cyclistes	90

Figure 26 Evolution de la charge d'entraînement annuel (bleu) et volume total (rouge)	100
Figure 27 Evolution des $P_{méca}$ records à l'intérieur des 5 zones d'intensité au cours des 6 saisons	101
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.....	115
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).....	115
Figure 30 PPR d'un cycliste avec les différentes zones d'intensités délimitées par les $P_{méca}$ records correspondantes	159
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	164
Figure 32 Exemple de fichier de suivi des $P_{méca}$ records.....	165
Figure 33 Article du journal L'Equipe du 14 décembre 2012 sur l'intérêt du PPR.....	167
Figure 34 Schématisation des écoulements dans la couche limite avec la transition entre les écoulements laminaires et les écoulements turbulents (Granger, 1985)	175
Figure 35 Exemples de la part de la traînée de pression et de frottement en fonction de l'écoulement et de la forme d'un objet (http://en.wikipedia.org/wiki/Drag_(physics)).....	176
Figure 36 Veine d'essai de la soufflerie de Magny-Cours avec l'ensemble cycliste - vélo positionné sur la balance de force	181
Figure 37 Représentation schématique de la mesure par dynamométrie du coefficient de résistance au roulement de l'ensemble cycliste - vélo sur tapis roulant (Henchoz et al., 2010)	183
Figure 38 Schéma du système de mesure de la méthode de décélération avec le placement des bandes de chronométrage comme décrit par Candau et al. (1999) (Schéma tiré de Debraux et al. (2011)).....	184

Figure 39 Illustrations d'une photographie utilisée pour estimer la surface frontale effective à partir de la méthode de pesée des photographies (A) et de la méthode de digitalisation (B)(Debraux et al., 2011)	186
Figure 40 Exemple d'application de la méthode CFD en cyclisme par l'équipe britannique olympique (Obtenu par UK Sport, Université de Sheffield et Totalsim Ltd avec le logiciel ANSYS FLUENT) (Hanna R. K., 2012)	187
Figure 41 Schématisation de la répartition de la traînée aérodynamique totale sur l'ensemble cycliste - vélo	189
Figure 42 Pourcentage de la traînée des différents segments du corps de plusieurs cyclistes dans 3 positions différentes (Defraeye et al., 2011a)	190
Figure 43 Comparaison des performances aérodynamiques de cinq casques de CLM dans une étude de Chabroux (2010)	194
Figure 44 Méthode expérimentale avec le mannequin et détails des roues testées dans l'étude de Barry et al. (2012).....	195
Figure 45 Géométries du cadre, de la fourche et des roues utilisées dans l'étude de Godo et al. (2011) ainsi qu'une visualisation des différences d'écoulement entre deux roues différentes avec un vent d'angle de 0°	196
Figure 46 Comparaison de l'ancien cadre Cervelo P4 et du nouveau cadre P5 en soufflerie et en CFD	197
Figure 47 Traînées aérodynamiques de l'ensemble mannequin + vélo en fonction de l'angle du vent entre le cadre Cervelo P5 (rouge) et sept cadres de marques concurrentes.....	197
Figure 48 Plan d'une soufflerie en circuit fermé à retours (Source : www.larousse.fr) et vues extérieures de la soufflerie ACE : ventilateur (1), aubes de virage (2), chambre de tranquillisation (3), convergent (4), veine d'essais (5).....	202
Figure 49 Veine d'essais en configuration « vélo » avec l'ensemble cycliste - vélo installé sur le plateau de mesure	204
Figure 50 Etape 1 : scanning du cycliste	205
Figure 51 Etape 2 : construction du fichier CAO.....	205
Figure 52 Image du maillage finalisée du coureur sur le vélo de CLM.....	205
Figure 53 Etape 3 : usinage des différents segments (pied et avant-bras sur ces photos).....	206

Figure 54 Etape 4 : reconstitution des membres inférieurs et de la tête.....	206
Figure 55 Premier montage du mannequin sur le vélo de CLM	207
Figure 56 Cycliste et son mannequin en position de CLM	207
Figure 57 Visualisation des écoulements pariétaux	209
Figure 58 Visualisation des écoulements pariétaux avec des fils de laine sur un casque	209
Figure 59 Dispositif de visualisation de l'écoulement avec une canne dotée d'un fil de laine à son extrémité	210
Figure 60 Visualisation de l'écoulement avec un fil de laine au niveau d'un casque.....	210
Figure 61 Exemples d'angle de vent atmosphérique s'appliquant sur le cycliste.....	212
Figure 62 Schématisation des différents vecteurs de vent s'appliquant sur le cycliste lors de son avancement	212
Figure 63 Vélodrome couvert de Roubaix	217
Figure 64 Image d'un fichier CAO finalisé d'un cycliste sur vélo de CLM.....	222
Figure 65 Exemple de maillage surfacique dans une étude CFD (Godo et al., 2011)	222
Figure 66 Exemple de maillage volumique dans une étude CFD de roues (Godo et al., 2011)	223
Figure 67 Visualisations des forces de pression (à gauche) et de cisaillement (à droite) sur l'ensemble cycliste – vélo	227
Figure 68 Visualisation sur un plan transversal de l'écoulement du flux d'air.....	227
Figure 69 Vélos de CLM Lapierre, Focus et Specialized	231
Figure 70 Relations $P_{méca}$ – angle du vent aux différentes vitesses des trois cadres de CLM	232
Figure 71 Mannequin positionné sur les cadres de CLM Lapierre et Specialized.....	234
Figure 72 Relations $P_{méca}$ – angle du vent à 50 km/h des cadres de CLM Lapierre et Specialized	235
Figure 73 Différences moyennes de $P_{méca}$ due à la traînée aérodynamique des composants du système cycliste - vélo avec les cadres de CLM Specialized et Trek en comparaison du cadre Lapierre CLM 2012.....	238

Figure 74 Forces de pression de l'écoulement de l'air exercées au niveau des freins avants, potences et tiges de selle dans la configuration n°1 (50 km/h sans vent) du cadre Lapierre (à gauche) et Trek (à droite).....	239
Figure 75 Visualisation de l'écoulement autour d'un tube kammtail (en haut) et d'un tube standard (http://freeflite.com/articles/trek-speed-concept-pg887.htm).....	241
Figure 76 Forces de pression de l'écoulement de l'air exercées au niveau des tubes de selle et tiges de selle dans la configuration n°1 (50 km/h sans vent) du cadre 2012 et du cadre Aerostorm (à droite).....	241
Figure 77 Forces de pression de l'écoulement de l'air exercées au niveau des freins avant, potences et tiges de selle dans la configuration n°1 (50 km/h sans vent) du cadre 2012 et du cadre Aerostorm (à droite).....	242
Figure 78 Forces de pression de l'écoulement de l'air exercées au niveau des freins arrière, dans la configuration n°1 (50 km/h sans vent) du cadre 2012 et du cadre Aerostorm (à droite).....	242
Figure 79 Forces de pression de l'écoulement de l'air exercées au niveau des tubes diagonaux et des bidons dans la configuration n°1 (50 km/h sans vent) du cadre 2012 et du cadre Aerostorm (à droite).....	243
Figure 80 Forces de pression de l'écoulement de l'air exercées au niveau des triangles arrières et des roues arrières dans la configuration n°1 (50 km/h sans vent) du cadre 2012 et du cadre Aerostorm (à droite).....	243
Figure 81 Différences moyennes de $P_{m\acute{e}ca}$ due à la traînée aérodynamique des composants du système cycliste - vélo avec les cadres de CLM Specialized et Lapierre Aerostorm en comparaison au Lapierre 2012.....	244
Figure 82 Différences de $P_{m\acute{e}ca}$ de la traînée aérodynamique des éléments du vélo Specialized et Lapierre Aerostorm en comparaison au Lapierre 2012 (configuration n°2 : vent de face).....	246
Figure 83 Différences de $P_{m\acute{e}ca}$ de la traînée aérodynamique des éléments du vélo Specialized et Lapierre Aerostorm en comparaison au Lapierre 2012 (configuration n°4 : vent de côté).....	247
Figure 84 Forces de cisaillement de l'écoulement de l'air exercées au niveau du vélo dans la configuration n°4 (vent de côté) du cadre 2012 et du cadre Aerostorm (en bas).....	248
Figure 85 Mannequin posé sur les deux vélos de CLM Lapierre 2012 et Aerostorm.....	249
Figure 86 Câbles externes des freins avant (à gauche) et arrière (à droite).....	249

Figure 87 Relations $P_{méca}$ – angle du vent à 50 km/h des cadres de CLM Lapierre 2012 et Aerostorm (sans et avec gaines de freins).....	251
Figure 88 Lignes de frottement mises en évidence au niveau du tube diagonal, du tube de direction, du tube de selle, de la fourche et des haubans arrières.....	252
Figure 89 Phénomène tourbillonnaire provoquée par la gaine de freins sur le tube de direction	253
Figure 90 Cadres utilisés pour les essais de validation sur vélodrome avec position identique de JR sur les trois vélos : Lapierre CLM 2012 (en haut), Lapierre Aerostorm (au milieu) et Specialized (en bas).....	256
Figure 91 Relations $P_{méca}$ – vitesse de JR sur vélodrome avec les 3 vélos.....	258
Figure 92 Relations $P_{méca}$ – angle du vent à 50 km/h des cadres CLM Lapierre 2012 et Aerostorm.....	260
Figure 93 Conditions testées : sans kit bidon, kit Elite 2012 et proto Elite 2013	261
Figure 94 Casques Uvex Race 2 (à gauche) et Race 4 (à droite)	266
Figure 95 Relations $P_{méca}$ – vitesse de TP avec les casques Uvex Race 2 et Race 4.....	268
Figure 96 Relations $P_{méca}$ – vitesse de AJ avec les casques Uvex Race 2 et Race 4.....	268
Figure 97 Relations $P_{méca}$ – vitesse de JR avec un vent d’angle de 0° avec les casques Uvex Race 2 et Race 4	268
Figure 98 Relations $P_{méca}$ – angle de vent de JR avec une vitesse de 50 km/h avec les casques Uvex Race 2 et Race 4	269
Figure 99 Vue de profil de TP avec casque Race 4.....	269
Figure 100 Superposition de la forme du casque Race 4 (en rouge) sur AJ	270
Figure 101 Ajout de la visière du casque Race 4 sur le casque Race 2.....	270
Figure 102 Superposition de la forme de casques de marques concurrentes sur AJ et TP ...	271
Figure 103 Vues de profil de ML avec les casques Uvex Race 2 (en haut à gauche), Race 4 (en haut à droite) et Race 6 (en bas).....	272
Figure 104 Relations $P_{méca}$ – vitesse de JR avec un vent d’angle de 0° avec les casques Uvex Race 4 et Race 6	274

Figure 105 Relations $P_{méca}$ – angle de vent de JR avec une vitesse de 50 km/h avec les casques Uvex Race 4 et Race 6	274
Figure 106 Relations $P_{méca}$ – vitesse de ML avec un vent d’angle de 0° avec les casques Uvex Race 2, Race 4 et Race 6	275
Figure 107 Relations $P_{méca}$ – angle de vent de ML avec une vitesse de 50 km/h avec les casques Uvex Race 2, Race 4 et Race 6	275
Figure 108 Relations $P_{méca}$ – vitesse du mannequin avec un vent d’angle de 0° avec les casques Uvex Race 2, Race 4 et Race 6	276
Figure 109 Relations $P_{méca}$ – angle de vent du mannequin avec une vitesse de 50 km/h avec les casques Uvex Race 2, Race 4 et Race 6	276
Figure 110 Relations $P_{méca}$ – vitesse de JR sur vélodrome avec les casques Uvex Race 4 et Race 6	278
Figure 111 Casques testés : Uvex Race 6 – Uvex race 4 – Alpina TT – Kask Bambino – Giro Selector	281
Figure 112 Casques Uvex Race 6 sur le mannequin en position standard et position de tête inclinée vers le bas	281
Figure 113 Relations $P_{méca}$ – vitesse du mannequin avec un vent d’angle de 0° avec les différents casques (position standard de la tête).....	282
Figure 114 Relations $P_{méca}$ – angle de vent du mannequin avec une vitesse de 50 km/h avec les différents casques (position standard de la tête)	283
Figure 115 Casque Uvex FP5 sprint avec coque externe sans aérations.....	287
Figure 116 Position sprint : debout sur les pédales, sans pédaler	287
Figure 117 Relations $P_{méca}$ – angle de vent de IG pour différentes vitesses avec les deux casques	288
Figure 118 Casques FP5 standard, FP5 sprint avec coque externe sans aérations, FP5 avec coque externe prototype 1 et FP5 avec coque prototype 2.....	290
Figure 119 Relations $P_{méca}$ – angle de vent de JR à 50km/h avec les différents casques.....	290
Figure 120 Mannequin équipé avec les quatre casques testés.....	291

Figure 121 Relations $P_{m\acute{e}ca}$ – angle de vent du mannequin à 50km/h avec les différents casques	292
Figure 122 Prototype du casque Alpina Elexxion (flèches rouges mettant en évidence l’armature en plastique).....	293
Figure 123 Coque externe sans aérations du modèle de casque Elexxion	294
Figure 124 Aérations du casque Specialized Evade et visualisation de l’écoulement laminaire à l’arrière du casque	298
Figure 125 Visualisation de l’écoulement turbulent à l’arrière du casque Alpina Elexxion.	298
Figure 126 Coque externe choisi pour le modèle aérodynamique du casque Alpina Elexxion	299
Figure 127 Combinaisons Moa testées : alvéolée 2011 manches longues, lisse 2012 manches longues et lisse 2012 manches courtes	302
Figure 128 Relations moyennes $P_{m\acute{e}ca}$ – angle du vent aux différentes vitesses des trois combinaisons Moa.....	304
Figure 129 Combinaisons testées : Moa 2012, Vermarc, Bioracer 1 alvéolée et Bioracer 2 lisse.....	305
Figure 130 Illustrations de l’étude CFD mettant en évidence les forces de pression appliquées avec un vent de 50 km/h.....	308
Figure 131 Illustrations de l’étude CFD mettant en évidence les forces de cisaillement sur le corps avec un vent de 50 km/h	308
Figure 132 Relations $P_{m\acute{e}ca}$ – angle de vent à 50 km/h du mannequin nu et du mannequin avec le fil 0,7mm posé à l’intérieur à l’extérieur des bras et des épaules.....	312
Figure 133 Configuration apportant les gains aérodynamiques les plus significatifs (4,4%), flèches rouges délimitant la position du fil de pêche	312
Figure 134 Lignes de frottement mises en évidence par la méthode de visualisation pariétale	313
Figure 135 Visualisation des écoulements pariétaux sur le casque, le dos et le flanc	313
Figure 136 Illustrations de la pose des fils à l’intérieur et à l’extérieur des bras	314

Figure 137 Relations $P_{méca}$ – vitesse de ML sur vélodrome des essais de modifications de la surface de la combinaison	316
Figure 138 Relations $P_{méca}$ – vitesse de JR sur vélodrome des essais de modifications de la surface de la combinaison	317
Figure 139 Relations $P_{méca}$ – vitesse de JR sur vélodrome des essais des combinaisons Moa et Btwin	319
Figure 140 Relations $P_{méca}$ – vitesse de ML sur vélodrome des essais des combinaisons Moa et Btwin	320
Figure 141 Visualisation de la combinaison B'twin sur ML (à gauche) et JR (à droite). Les flèches rouges mettent en évidence les plis au niveau des articulations sur JR.	320
Figure 142 Combinaison Moa manches courtes	323
Figure 143 Combinaison B'twin 2013	324
Figure 144 Combinaison prototype B'twin 2014. Au milieu : creux au niveau de la nuque. A droite : allongement de l'encolure.....	325
Figure 145 Combinaison prototype B'twin avec zipp dans le dos.....	325
Figure 146 Textile ultra-lisse Moa au niveau des bras avec bandelettes zig-zag.....	328
Figure 147 Textile B'twin rainuré dans le sens horizontal avec bandelettes zig-zag	328
Figure 148 Textile B'twin rainuré dans le sens vertical.....	329
Figure 149 Essais des textiles B'twin rainuré (à gauche) et ultra-lisse Moa (à droite) dans le dos	329
Figure 150 Configuration offrant les meilleurs gains aérodynamiques avec textile rainuré dans le sens vertical au niveau des bras et des épaules, et textile ultra-lisse Moa dans le dos	330
Figure 151 Combinaisons B'twin 2014 (à gauche) et prototype (à droite).....	332
Figure 152 Relations $P_{méca}$ – angle du vent aux différentes vitesses des deux combinaisons B'twin.....	333
Figure 153 Résumé des gains aérodynamiques moyens obtenus avec l'amélioration du matériel et des équipements au cours de ce projet d'optimisation de la traînée aérodynamique totale du système cycliste - vélo.....	337

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).....	74
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)	76
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)	77
Tableau 4 Traînée aérodynamiques à 53 km/h d'un ensemble cycliste - vélo avec les différentes combinaisons Nike développées au cours de leurs recherches dans différentes conditions (statiques et lors du pédalage) (Brownlie et al., 2009). La combinaison de l'année 2003 est considérée comme la référence dans leur étude comparative.....	192
Tableau 5 Protocole incrémental de test sur vélodrome	218
Tableau 6 Etapes de réalisation d'un calcul CFD	221
Tableau 7 Détails des configurations testées dans l'étude CFD	226
Tableau 8 Matériels et équipements pour l'étude comparative de cadres de CLM	231
Tableau 9 Matériels et équipements pour l'étude comparative des cadres Lapierre et Specialized avec le mannequin.....	234
Tableau 10 Différences relatives de $P_{méca}$ entre les cadres Lapierre et Specialized selon les conditions de vent.....	235
Tableau 11 Détails des différences de $P_{méca}$ due à la traînée aérodynamique des composants du système cycliste - vélo avec les cadres Specialized et Trek en comparaison au Lapierre 2012 dans les 4 configurations d'essai	237
Tableau 12 Détails des différences de $P_{méca}$ de la traînée aérodynamique des composants du système cycliste - vélo avec les cadres Specialized et Lapierre Aerostorm en comparaison au Lapierre 2012 dans les 4 configurations d'essai	245
Tableau 13 Matériels et équipements pour la validation en soufflerie du cadre Aerostorm avec le mannequin	250

Tableau 14 Différences relatives de $P_{m\acute{e}ca}$ entre les cadres Lapierre 2012 et Aerostorm (sans et avec gaines) selon les conditions de vent.....	251
Tableau 15 Détails des essais de modifications de la surface du cadre avec les différences de traînée aérodynamique en comparaison à la configuration de référence (cadre nu).....	254
Tableau 16 Matériels et équipements de JR pour les essais de validation du cadre Lapierre Aerostorm.....	257
Tableau 17 Différences relatives de $P_{m\acute{e}ca}$ avec les cadres Lapierre Aerostorm et Specialized par rapport au cadre de référence Lapierre 2012.....	257
Tableau 18 Matériels et équipements pour la validation en soufflerie (2 ^{ème} essai) du cadre Aerostorm avec le mannequin.....	259
Tableau 19 Différences relatives de $P_{m\acute{e}ca}$ entre les cadres Lapierre 2012 et Aerostorm selon les conditions de vent.....	260
Tableau 20 Matériels et équipements pour la validation en soufflerie du kit bidon – porte-bidon Elite avec le mannequin.....	261
Tableau 21 Différences relatives de $P_{m\acute{e}ca}$ entre les différentes conditions de kit bidon selon les conditions de vent.....	262
Tableau 22 Matériels et équipements des cyclistes pour les essais du casque Race 4 en soufflerie.....	267
Tableau 23 Matériels et équipements des cyclistes pour les essais de validation du casque Race 6 en soufflerie.....	273
Tableau 24 Matériels et équipements de JR pour les essais de validation du casque Race 6 sur vélodrome.....	277
Tableau 25 Différences des $P_{m\acute{e}ca}$ estimées en soufflerie et sur vélodrome (en %) entre le casque Uvex Race 6 et le casque Race 4.....	278
Tableau 26 Matériels et équipements du mannequin pour l'étude comparative de casques en soufflerie.....	280
Tableau 27 Différences relatives de $P_{m\acute{e}ca}$ (en %) entre les différents casques par rapport au casque CLM Uvex Race 6.....	283
Tableau 28 Matériels et équipements de IG pour les essais du casque Uvex FP5 sprint en soufflerie.....	286

Tableau 29 Matériels et équipements pour les essais du casque Uvex FP5 sprint en soufflerie	289
Tableau 30 Matériels et équipements pour les essais de casques en soufflerie	294
Tableau 31 Visualisations des casques et coques testés avec leur impact sur la traînée aérodynamique totale en comparaison avec le casque référence Alpina Elexxion standard .	295
Tableau 32 Matériels et équipements pour les essais de la nouvelle combinaison Moa en soufflerie.....	303
Tableau 33 Matériels et équipements pour l'étude comparative de combinaisons en soufflerie	305
Tableau 34 Différences relatives de $P_{méca}$ (en %) des combinaisons testées par rapport à la combinaison référence Moa 2012	306
Tableau 35 Matériels et équipements pour les essais de modifications de la surface du mannequin	309
Tableau 36 Détails des essais de modifications de la surface du mannequin avec les différences de traînée aérodynamique en comparaison à la configuration de référence (mannequin nu)	310
Tableau 37 Matériels et équipements pour les essais de modifications de la surface de la combinaison sur des cyclistes	315
Tableau 38 Différences relatives de $P_{méca}$ avec les modifications sur la combinaison par rapport à la condition de référence	316
Tableau 39 Matériels et équipements pour les essais de combinaisons.....	318
Tableau 40 Différences relatives de $P_{méca}$ avec la combinaison B'twin par rapport à la combinaison Moa	319
Tableau 41 Matériels et équipements pour les essais de combinaisons en soufflerie.....	321
Tableau 42 Détail des essais et des combinaisons testées.....	322
Tableau 43 Différences relatives de $P_{méca}$ (en %) et gains/pertes chronométriques entre les différentes combinaisons par rapport à la combinaison de référence Moa 2012	323
Tableau 44 Détail des textiles et de leurs emplacements lors de chaque essai	326

Tableau 45 Différences relatives de $P_{méca}$ (en %) et gains/pertes chronométriques entre les différentes essais par rapport à la condition de référence (mannequin nu)..... 327

Tableau 46 Matériels et équipements pour les essais de combinaisons en soufflerie..... 331

Tableau 47 Différences relatives de $P_{méca}$ entre les différentes conditions de kit bidon selon les conditions de vent 332

Tableau 48 Avantages, limites et recommandations de chacune des méthodologies utilisées dans ce travail de thèse 338

INTRODUCTION GENERALE

Contexte

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

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

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

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

Introduction

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

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

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

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

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

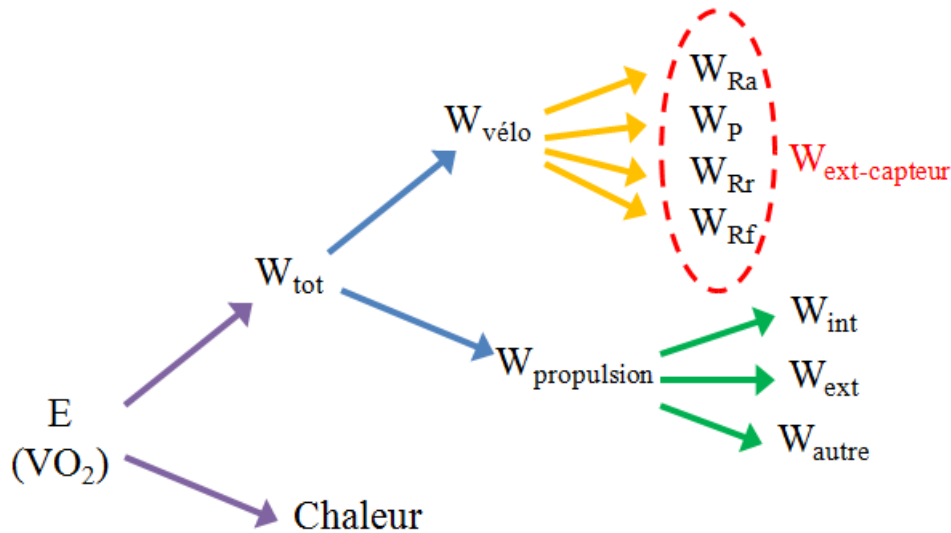


Figure 1 Cascade de la dépense énergétique totale aux différentes formes de travail mécanique généré (adapté de Minetti, 2011)

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

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

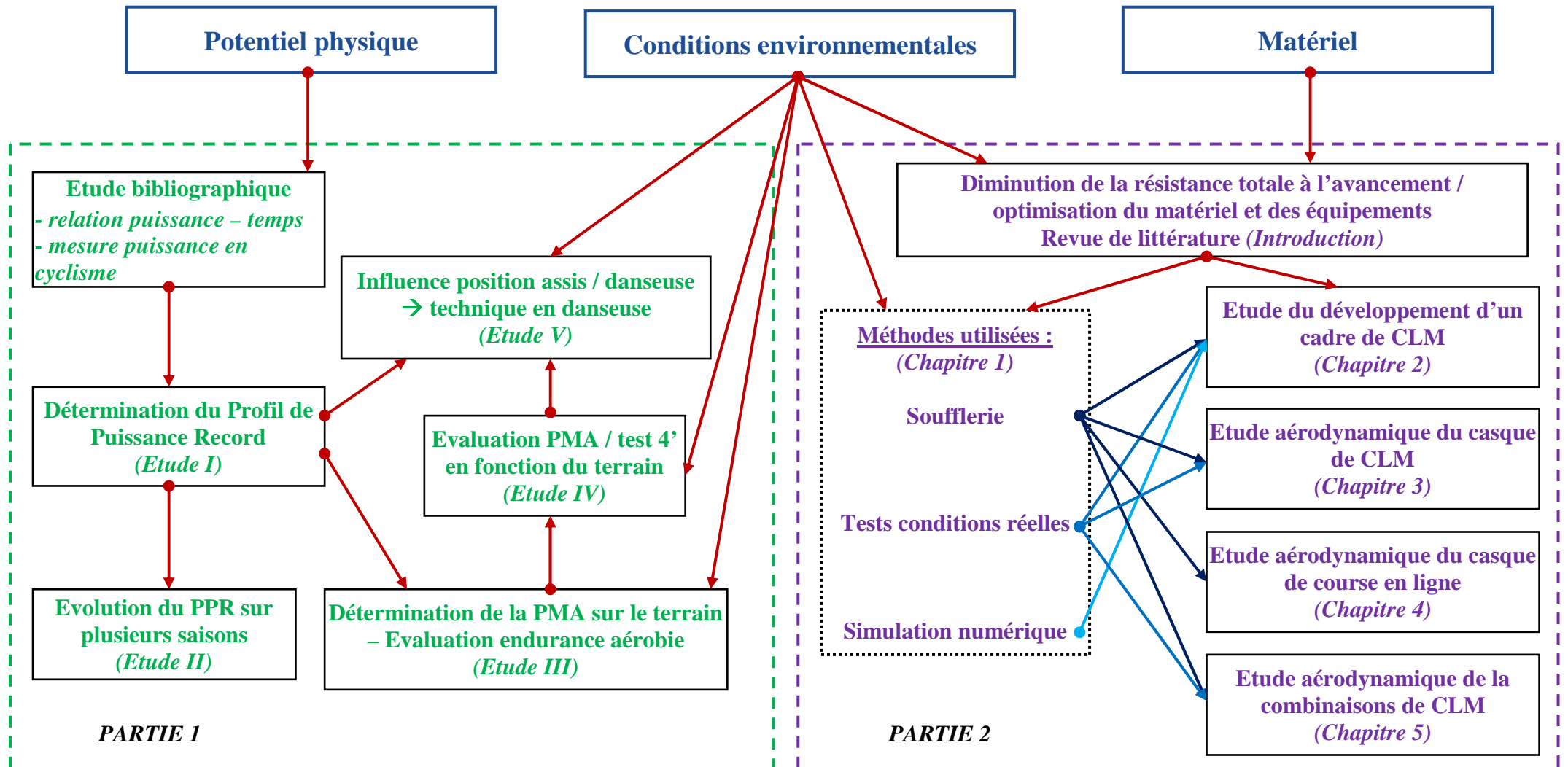
La deuxième forme de travail composant W_{tot} correspond au travail produit pour faire avancer le système homme – machine dans l'espace ($W_{\text{vélo}}$). Ainsi, $W_{\text{vélo}}$ résulte du travail produit pour vaincre les différentes résistances à l'avancement: la résistance de l'air (W_{Ra}), la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

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

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

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

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



Structuration de la thèse

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

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

**PARTIE 1 : EVALUATION DU POTENTIEL
PHYSIQUE**

CHAPITRE 1 : Etude bibliographique

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

1. Etude de la relation intensité – temps

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

1.1. Modèles empiriques

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

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

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

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

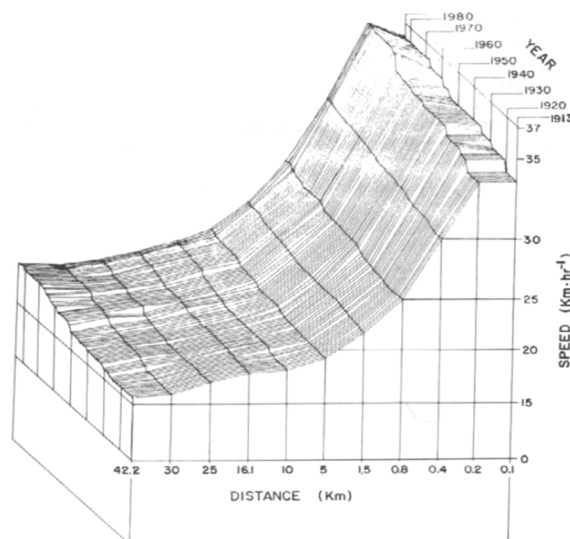


Figure 2 Evolution des records du Monde en course à pied de 1913 à 1985, du 100 m au marathon (temps de chaque épreuve rapporté en vitesse moyenne) (Frederick, 1986)

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

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

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

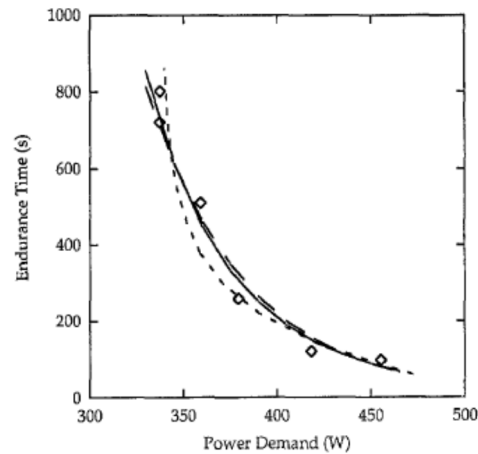


Figure 3 Comparaison de 3 modèles mathématiques avec la puissance en abscisse à partir d'un cas concret (Grosse – Lordeman et Muller (trait plein), Bigland – Ritchie et Woods (grands pointillés) et Hopkins et coll (petits pointillés)) (Morton et Hodgson, 1996)

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

1.2. Modèles bioénergétiques

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

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

l'équation 4 il prend en compte la capacité des stocks énergétiques, la consommation d'oxygène au cours de l'exercice et les caractéristiques propres à chaque athlète :

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

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

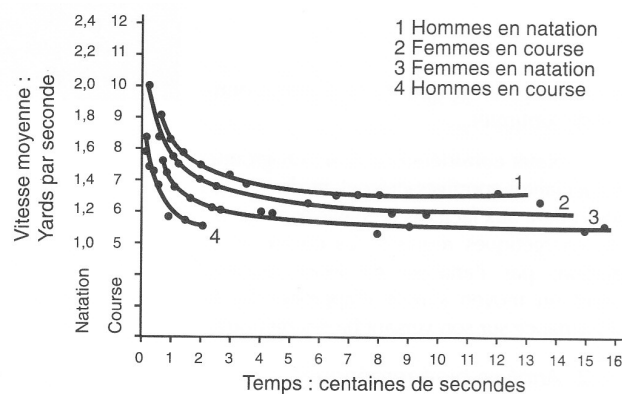


Figure 4 Relation vitesse – temps en course à pied et en natation (Hill A., 1927) (adapté par Billat, 2003)

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

1.2.1. Concept de la puissance critique

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

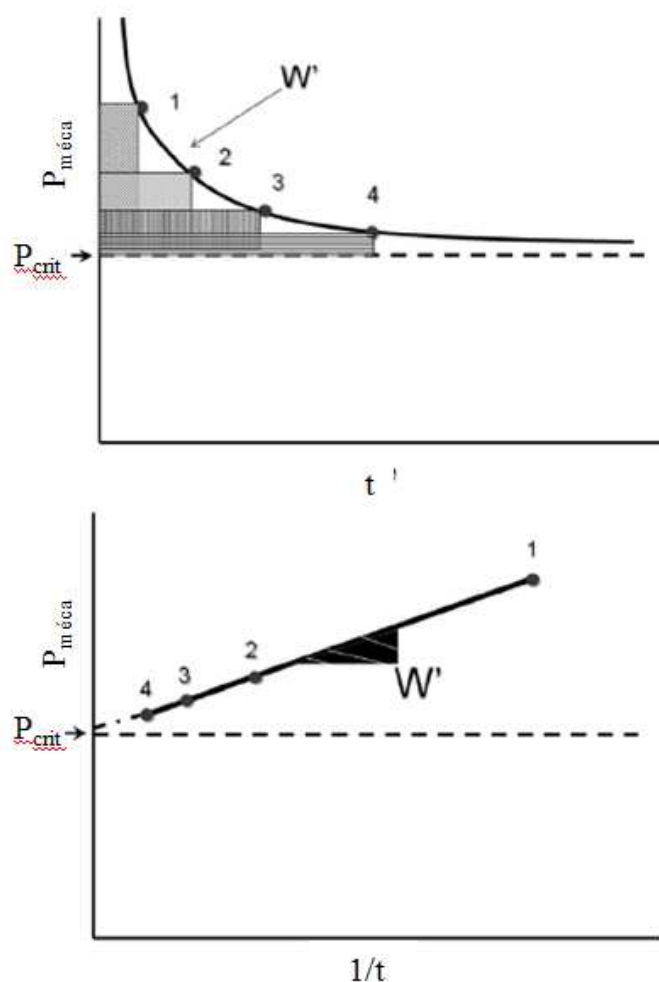


Figure 5 En haut : illustration de la relation $P_{méca} - \text{temps}$. Les chiffres 1 à 4 représentent les $P_{méca}$ atteintes en fonction des durées d'épuisement pour des tests indépendants. En bas : détermination de P_{crit} et W' à partir de la relation $P_{méca} - 1/\text{temps}$ (adapté de Jones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

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

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

travail anaérobie (W') ;

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

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

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

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

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

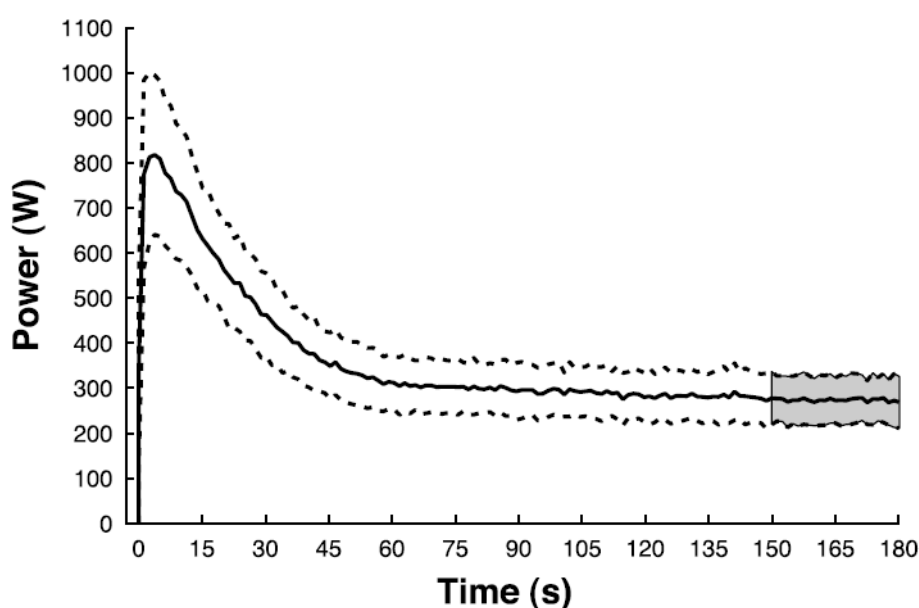


Figure 6 Evolution de la $P_{méca}$ moyenne de 14 sujets sur un test « all-out » 3 min. La zone grisée correspond à la moyenne des 30 dernières secondes à partir desquelles la P_{crit} est déterminée (Francis J. T. et al., 2010)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

1.2.3. Autres modèles bioénergétiques

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

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

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

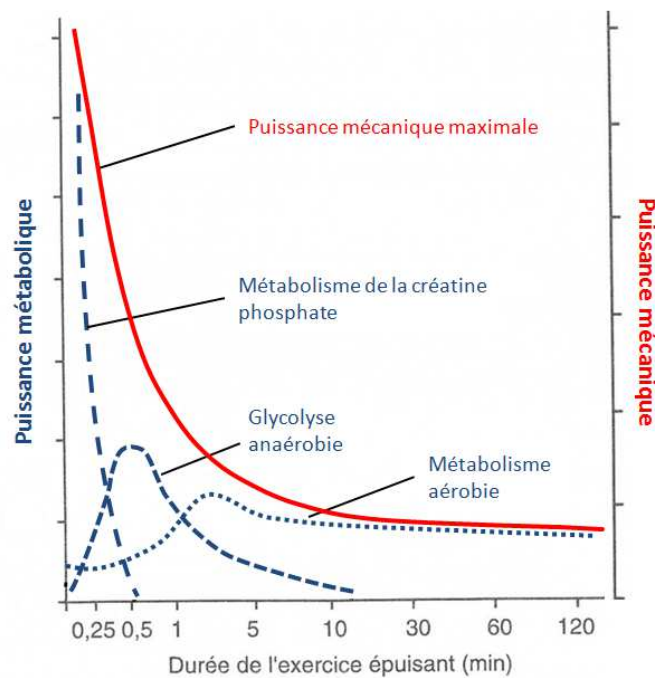


Figure 7 Diminution de la $P_{méca}$ maximale expliquée par rapport à la part de production énergétiques des différents métabolismes (adapté de la courbe d'Howald)

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

Le modèle de Morton comporte 3 réservoirs :

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

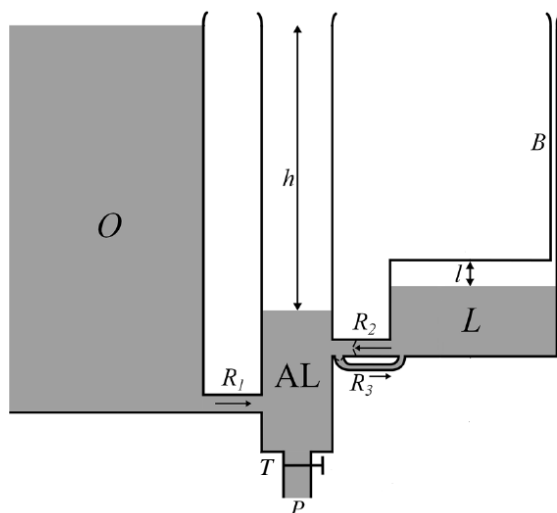


Figure 8 le modèle hydraulique à 3 composantes de Morton (adapté de Sundström et al. (2014))

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

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

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

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

Si le robinet est maintenant fermé, c'est-à-dire que l'exercice s'arrête, AL commencera à se remplir à travers 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 $\dot{V}O_{2max}$ (% $\dot{V}O_{2max}$) ou de PMA (%PMA) ou de VMA (%VMA) susceptible d'être maintenu au cours d'une épreuve d'une durée donnée (Lacour et Flandrois, 1977 ; Tokmakidis *et al.*, 1987 ; Bosquet *et al.*, 2002). L'endurance est ainsi définie différemment selon les auteurs, c'est pourquoi il existe d'autant plus de méthodes d'évaluation à partir de l'analyse de la relation intensité – temps propre à chaque athlète.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

On référence de nombreuses modélisations de la décroissance de % $\dot{V}O_{2max}$ utilisée suivant le temps d'exercice.

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

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

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

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

(Avec t : durée d'exercice)

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

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

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

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

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

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

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

Ils ont également proposé une autre équation standard :

$$- \%_{\dot{V}O_{2max}} = 126.69 - 11.056 \log t \quad (15)$$

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

$$- \%_{\dot{V}O_{2max}} = 109.837 \log t^{-0.202} \quad (16)$$

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

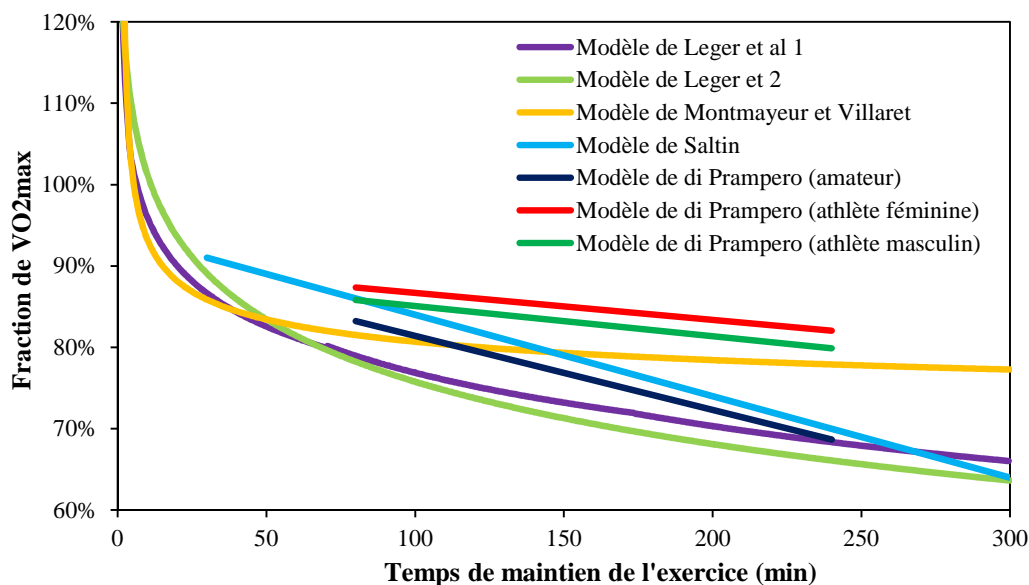


Figure 9 Comparaison des différentes modélisations d'évolution de la fraction de $\dot{V}O_{2max}$ soutenue selon le temps d'exercice (d'après les données de Léger et al. (1986), de Montmayer et Villaret (1990), de Saltin (1973) et de di Prampero (1986))

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

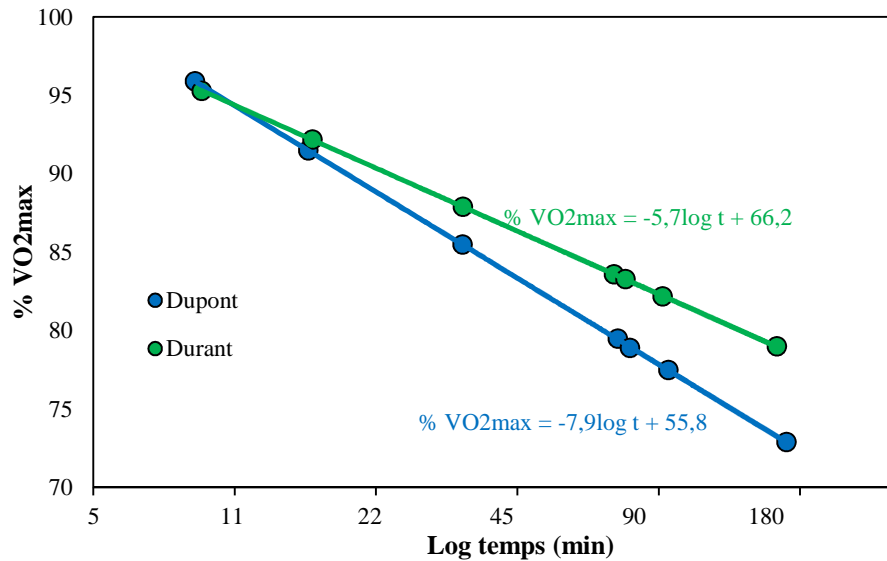


Figure 10 Illustration graphique et mathématique de l'évaluation de l'indice d'endurance de deux athlètes (Durant et Dupont) à partir de plusieurs performances réalisées en course à pied dont les $\%VO_{2max}$ équivalents ont été estimés. Dans cet exemple, Durant a une capacité d'endurance plus élevée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

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).

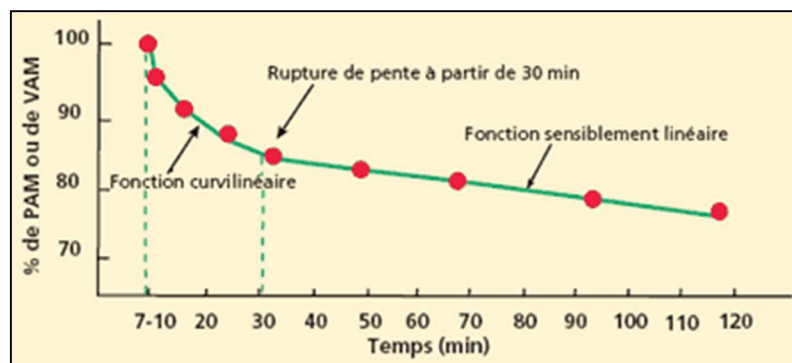


Figure 11 Décroissance de la durée limite maintenue en fonction du $\%VMA$ utilisée (Cazorla, 2001)

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 $\dot{V}O_{2\max}$ comme l'ont également montré Tokmakidis *et al.* (1987). C'est notamment à l'aide de ce nomogramme que Mercier défend l'idée intéressante selon laquelle un bon dosage des intensités et des durées des entraînements n'est rationnel qu'après une analyse de l'intégralité de la courbe de performance et non pas uniquement à partir de la valeur de la VMA.

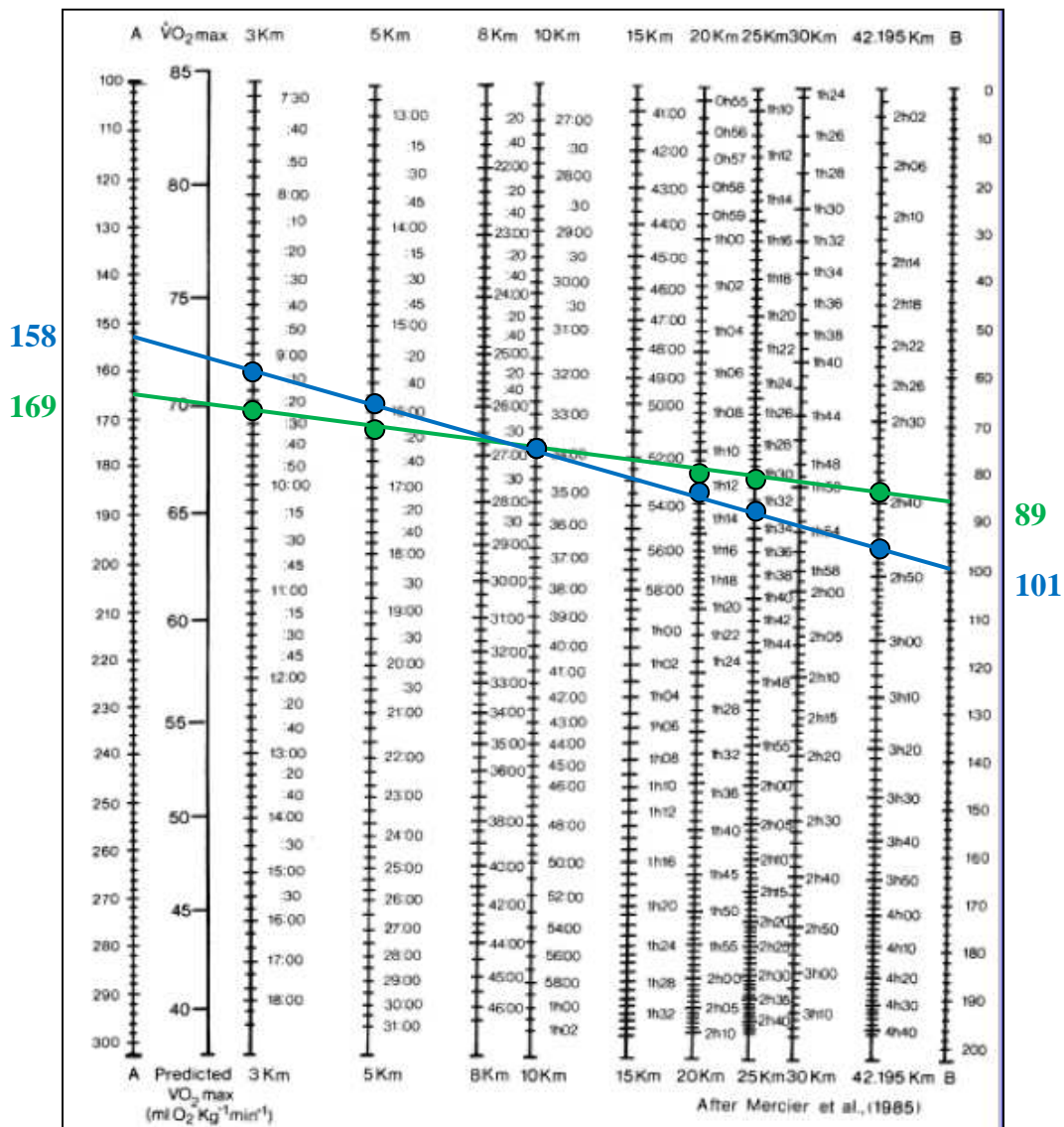


Figure 12 Nomogramme de Mercier *et al.* (1984). Exemple de calcul de l'IE de Dupont (bleu) et Durant (vert) à partir de performances réalisées en course à pied (IE = indice A – indice B). Durant a une capacité d'endurance plus élevée (IE : 169-89=80) que Dupont (158-101=57). Exemple d'après les mêmes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

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

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

2.1. Relation intensité – temps en cyclisme

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

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

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

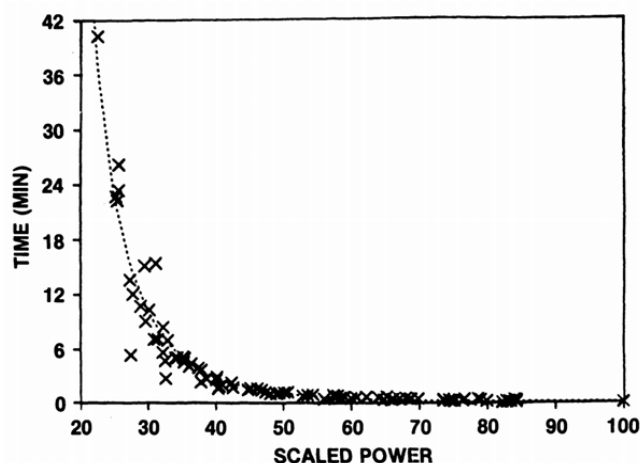


Figure 13 Modélisation de la relation temps – $\%P_{max}$ obtenue à partir d'essais en laboratoire avec des cyclistes (Harman et al., 1987)

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

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

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

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

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

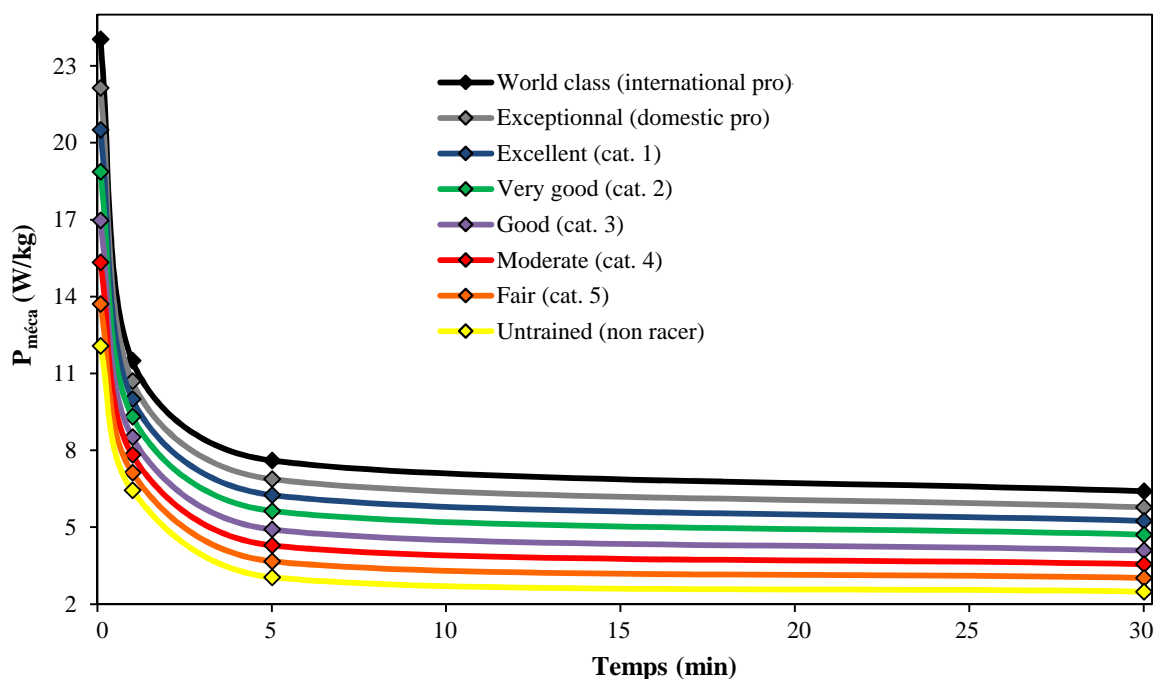


Figure 14 Relation $P_{méca}$ - temps adaptée à partir du tableau de Coggan (pour des athlètes masculins) (Allen et Coggan, 2010)

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

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

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

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

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

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

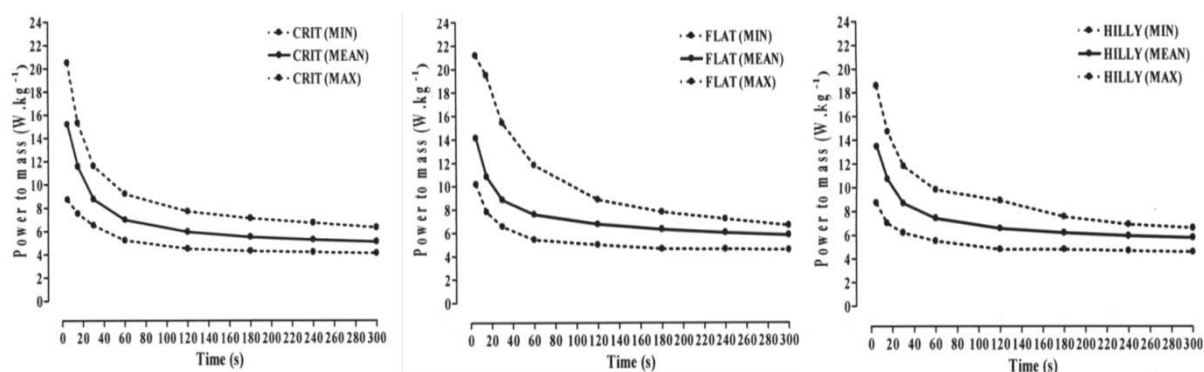


Figure 15 Relations $P_{\text{méca}}$ – temps pour des critères (CRIT), étapes plates (FLAT) et étapes montagneuses (HILLY) d'une course à étapes (Ebert *et al.*, 2006)

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

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

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

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

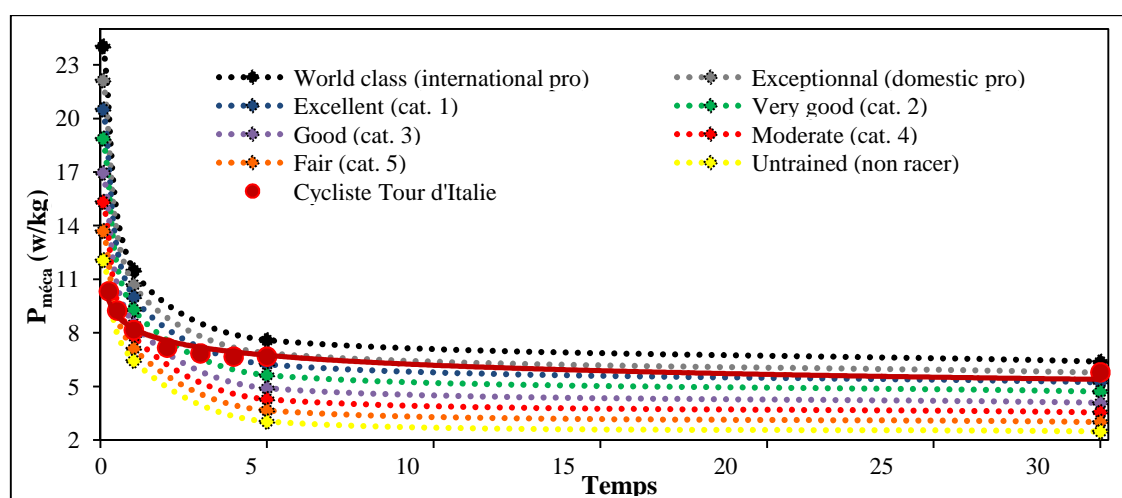


Figure 16 Relation $P_{m\acute{e}ca}$ – temps (en rouge foncé) d'un cycliste lors du Tour d'Italie par rapport aux niveaux définis par Allen et Coggan (2010) à partir des records de puissance maximale développés sur cette course à étapes, d'après les données de Vogt *et al.* (2007)

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

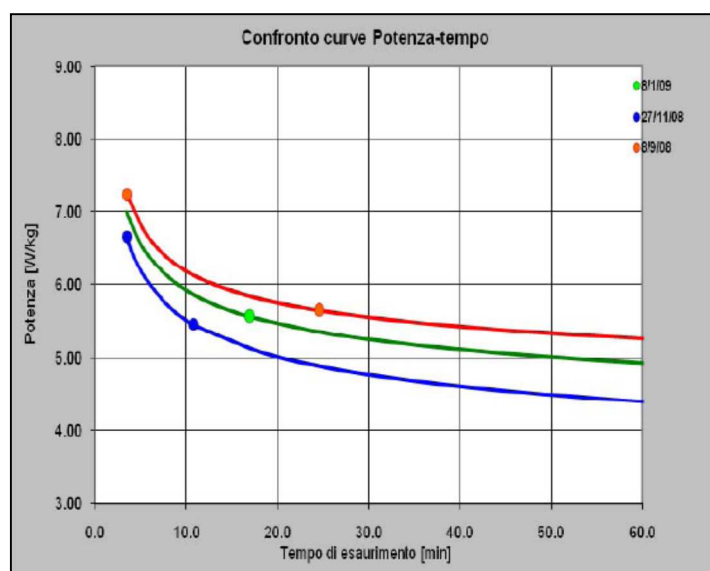


Figure 17 Evolution de la courbe $P_{méca}$ - temps d’un cycliste à partir d’un test de t_{lim} (Sassi, mapeisport.it/ivanbasso)

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

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

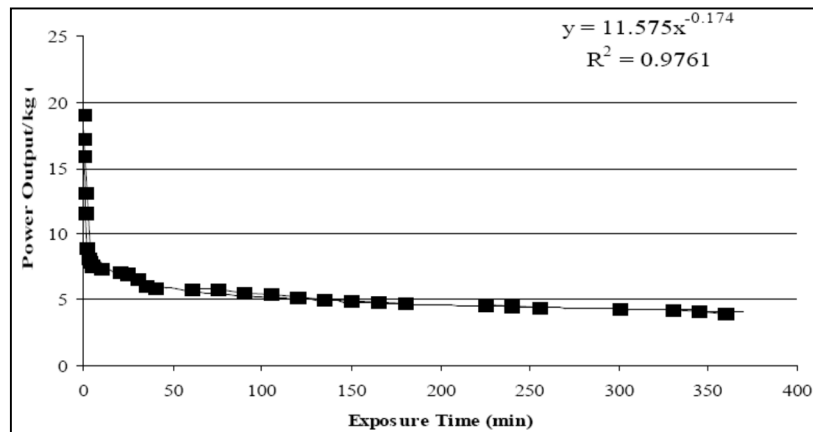


Figure 18 Relation $P_{méca}$ - temps de maintien à partir du suivi de 5 cyclistes professionnels (Larrazabal *et al.*, 2006)

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).

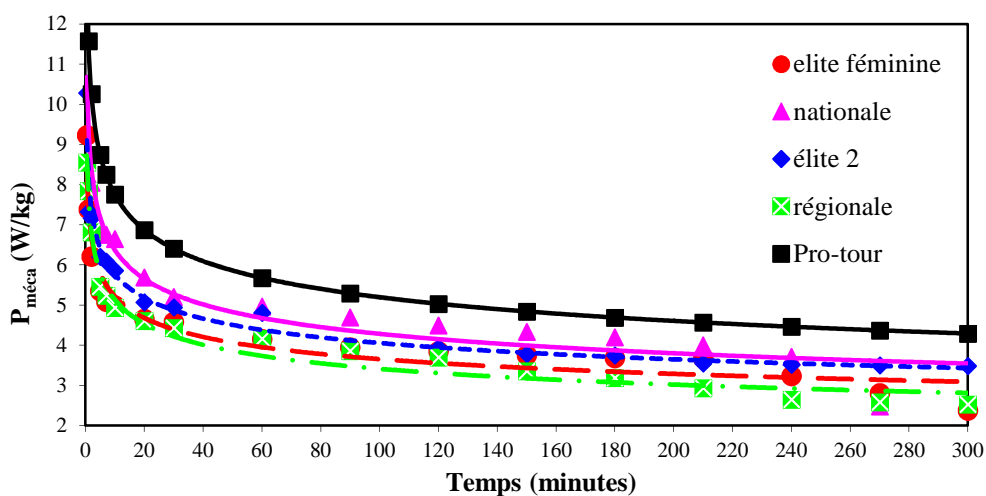


Figure 19 Profil de puissance de 5 cyclistes de différents niveaux (Villerius *et al.*, 2007)

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 :

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

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

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

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

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



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

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



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

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

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

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

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

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



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

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

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



Figure 23 Etalonnage par une méthode statique du pédalier SRM

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



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

3. Synthèse et objectifs de travail

Bien que les recherches sur l'analyse de la relation intensité – temps ont débuté il y a plus d'un siècle, la littérature scientifique reste pauvre en ce qui concerne l'étude de cette relation en cyclisme. La majorité des travaux ont été réalisés en laboratoire en utilisant des concepts et des modélisations difficilement exploitables sur le terrain auprès d'athlètes de haut niveau. Cependant, l'amélioration des connaissances au cours des dernières décennies a permis de mieux appréhender les mécanismes physiologiques qui ont lieu lors d'efforts physiques maximaux. Elles ont permis une meilleure compréhension des processus sous-jacents responsables de la relation intensité – temps. A partir de la mesure directe en conditions réelles de la $P_{méca}$ 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'entraînement. De plus, deux études complémentaires ont été conduites afin de mieux comprendre l'influence 1) des conditions et du profil du terrain sur la production de $P_{méca}$ 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 – vitesse : $P_{méca}$ record entre 1 et 30 sec).

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

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

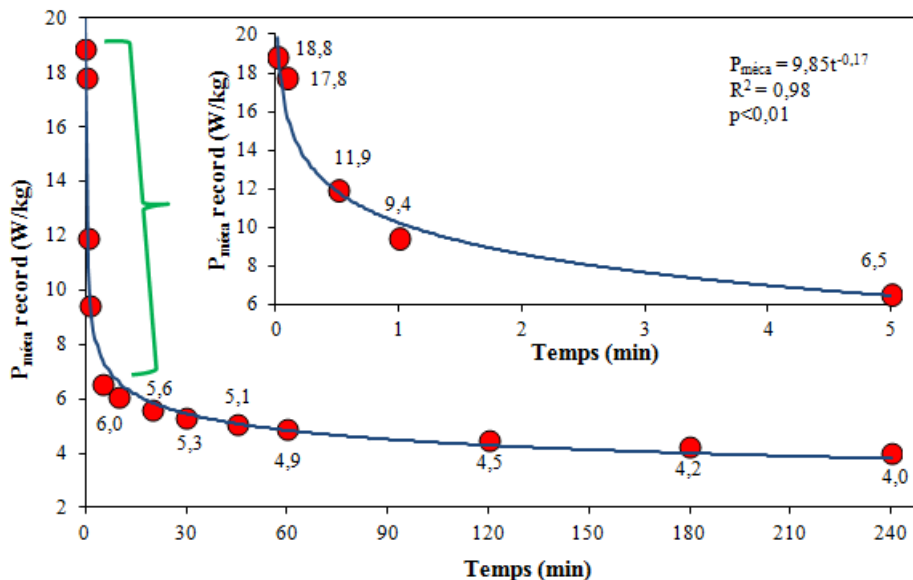


Figure 25 PPR moyen des 17 cyclistes

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

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

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

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

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

The Record Power Profile to Assess Performance in Elite Cyclists

Authors

J. Pinot, F. Grappe

Affiliation

Département Santé et Sports, Equipe Culture – Sport – Santé – Société (C3S) UPFR-Sports, 31 chemin de l'épita phe, 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 VO₂max which can be sustained and the running time from 7 min to 2 h.

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

accepted after revision
May 09, 2011

Bibliography

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

Correspondence

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

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

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

Methods



Subjects

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

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

SRM measurements

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

SRM data analyses

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

Exercise intensity zones

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

Statistics

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

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

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

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

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

Results

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

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

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

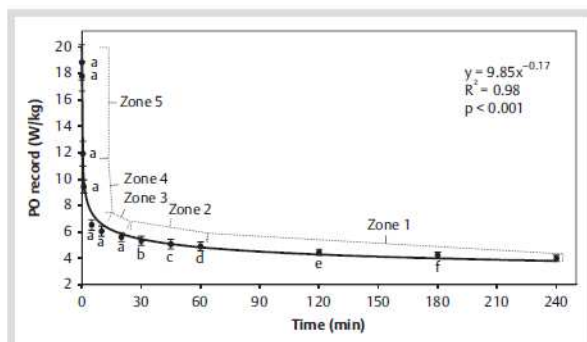


Fig. 1 Average RPP of the 17 cyclists.

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

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

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

Discussion

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

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

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

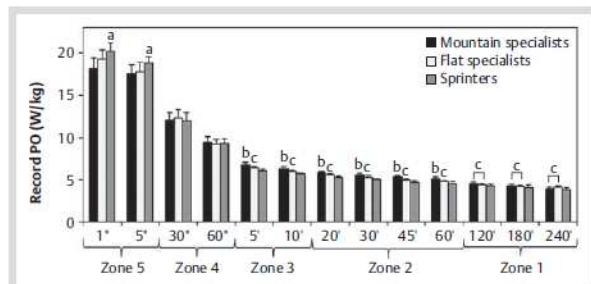


Fig. 2 RPP according to the cyclist's skills and exercise intensity zones. ^a significant difference between climbers and flat specialists ($p < 0.05$), ^b significant difference between sprinters and flat specialists ($p < 0.05$), ^c significant difference with sprinters ($p < 0.05$).

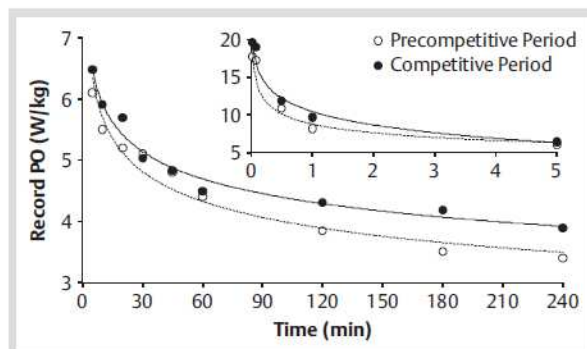


Fig. 3 Changes in cyclist's RPP between the pre-competitive period (December to March) and the competitive period (March to September) on time durations between 1 s–5 min (top panel) and between 5 min–4 h (bottom panel).

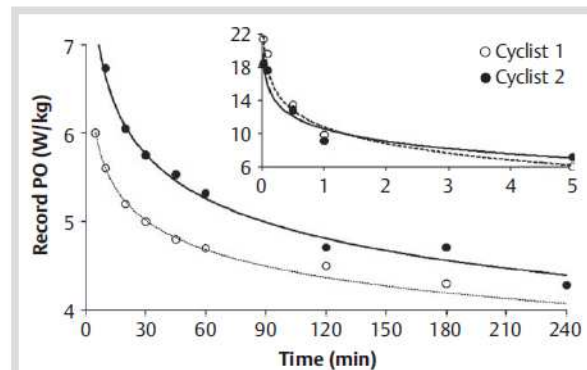


Fig. 4 Comparison of the RPP of 2 cyclists on time durations between 1 s–5 min (top panel) and between 5 min–4 h (bottom panel).

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

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

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

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

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

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

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

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

Acknowledgements

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

References

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

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

CHAPITRE 3 : Suivi longitudinal du PPR

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

Résumé détaillé

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

Pinot J et Grappe F

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

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

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

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

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

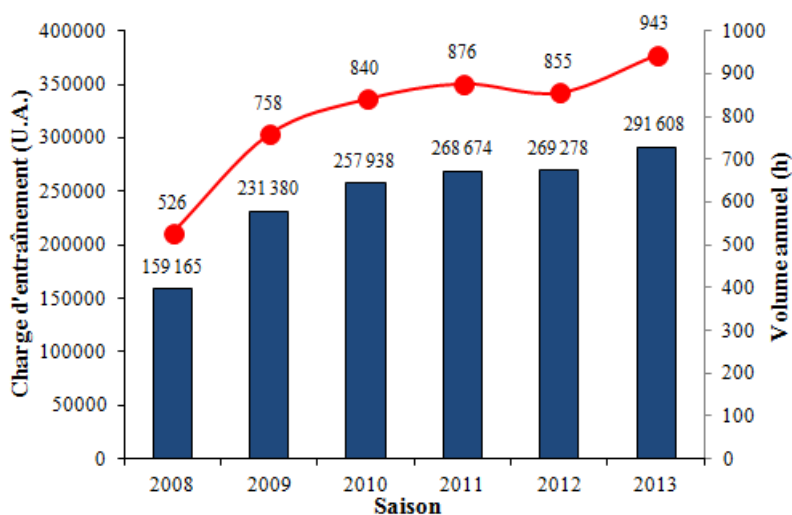


Figure 26 Evolution de la charge d'entraînement annuel (bleu) et volume total (rouge)

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

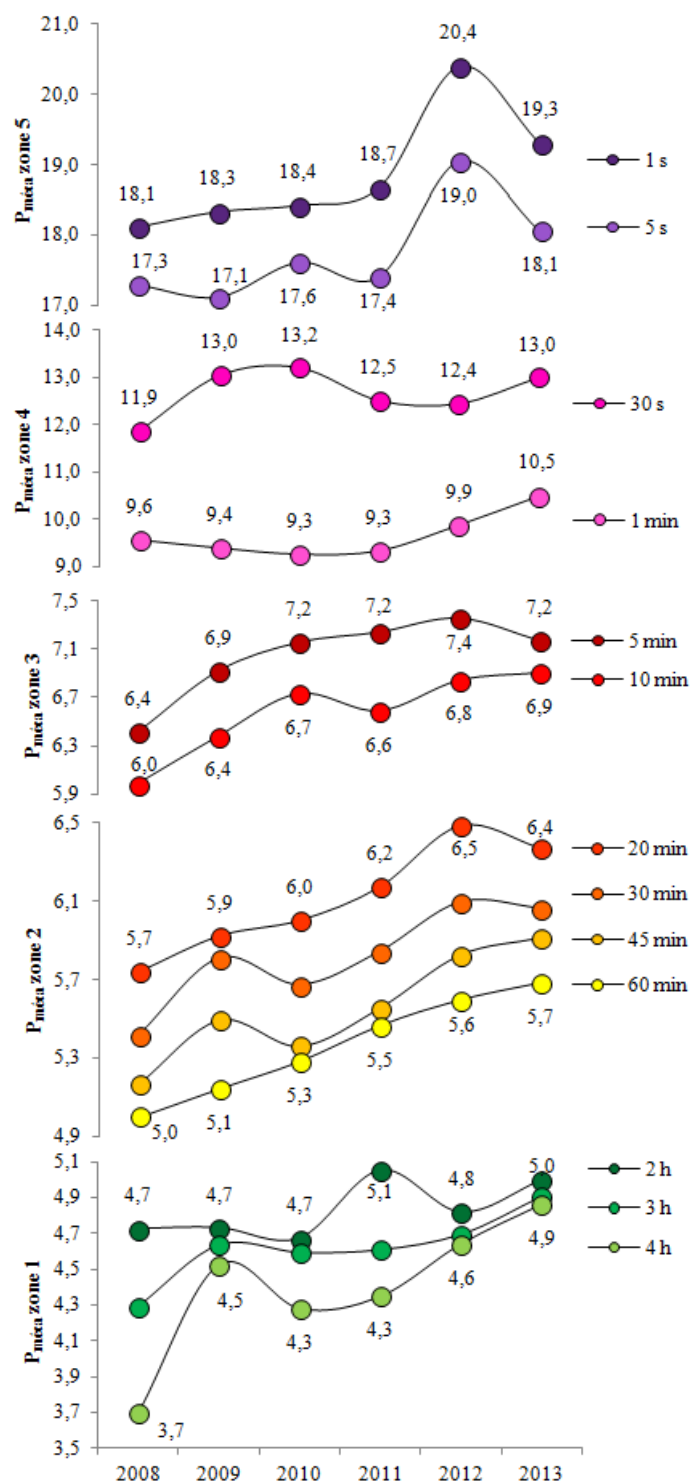


Figure 27 Evolution des $P_{méca}$ records à l'intérieur des 5 zones d'intensité au cours des 6 saisons

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

Discussion : Le résultat principal de cette étude montre que l'augmentation des principaux indices de la charge d'entraînement évalués avec la méthode de Foster *et al.* (2001) au cours des 6 années de suivi était significativement corrélé avec l'amélioration du potentiel aérobie du cycliste, caractérisé par une augmentation des $P_{méca}$ 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 confirment que le PPR est un concept pertinent pour mettre en valeur les capacités physiques des cyclistes et suivre leur évolution sur le long terme.

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

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

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

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

(Accepted 20 September 2014)

Abstract

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

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

Introduction

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

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

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

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

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

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

Methods

Participant

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

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

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

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

SRM measurements

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

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

SRM data analysis

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

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

Quantification of internal training load

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

Statistics

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

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

Results

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

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

4 J. Pinot & F. Grappe

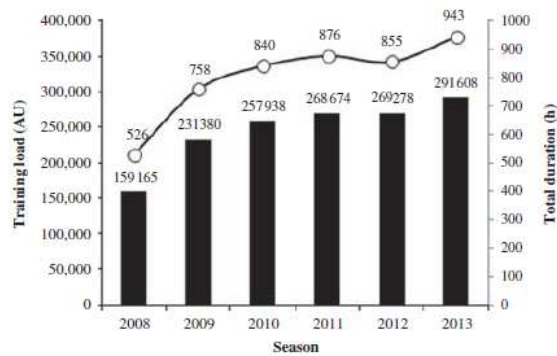


Figure 1. Changes in the annual training load (black bar) and total duration (white circle) (AU: Arbitrary Unit).

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

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

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

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

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

Discussion

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

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

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

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

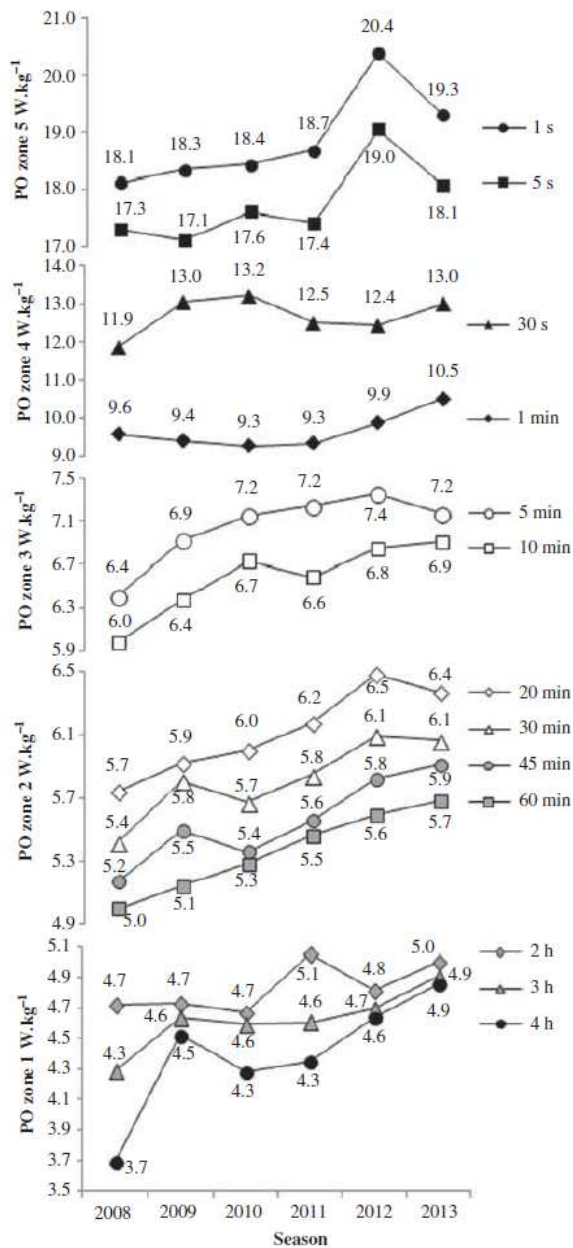


Figure 2. Changes in the different record power outputs (PO) throughout the six competitive seasons within the five exercise intensity zones.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Conclusion

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

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

Acknowledgements

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

Funding

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

References

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

- Sports Medicine*, 39(10), 833–844. doi:10.2165/11317840-000000000-00000
- Jones, A. M. (1998). A five year physiological case study of an Olympic runner. *British Journal of Sports Medicine*, 32(1), 39–43.
- Jones, A. M. (2006). The physiology of the world record holder for the women's marathon. *International Journal of Sports Science and Coaching*, 1(2), 101–116.
- Lacour, J.-R., Messonnier, L., & Bourdin, M. (2009). Physiological correlates of performance. Case study of a world-class rower. *European Journal of Applied Physiology*, 106(3), 407–413. doi:10.1007/s00421-009-1028-3
- Lamberts, R. P., Rietjens, G. J., Tijdink, H. H., Noakes, T. D., & Lambert, M. I. (2010). Measuring submaximal performance parameters to monitor fatigue and predict cycling performance: A case study of a world-class cyclo-cross cyclist. *European Journal of Applied Physiology*, 108(1), 183–190. doi:10.1007/s00421-009-1291-3
- Lucia, A., Hoyos, J., Perez, M., Santalla, A., Eamest, C. P., & Chicharro, J. L. (2004). Which laboratory variable is related with time trial performance time in the Tour de France? *British Journal of Sports Medicine*, 38, 636–640.
- Messonnier, L., Bourdin, M., & Lacour, J. (1998). Influence de l'âge sur différents facteurs déterminants de la performance sur ergomètre aviron. *Science and Sports*, 13(6), 293–294. doi:10.1016/s0765-1597(99)80011-2
- Mikulic, P. (2011). Maturation to elite status: A six-year physiological case study of a world champion rowing crew. *European Journal of Applied Physiology*, 111(9), 2363–2368. doi:10.1007/s00421-011-1870-y
- Nevill, A. M., Jobson, S. A., Davison, R. C., & Jeukendrup, A. E. (2006). Optimal power-to-mass ratios when predicting flat and hill-climbing time-trial cycling. *European Journal of Applied Physiology*, 97(4), 424–431. doi:10.1007/s00421-006-0189-6
- Nimmerichter, A., Eston, R. G., Bachl, N., & Williams, C. (2011). Longitudinal monitoring of power output and heart rate profiles in elite cyclists. *Journal of Sports Sciences*, 29(8), 831–839.
- Nimmerichter, A., Williams, C., Bachl, N., & Eston, R. (2010). Evaluation of a field test to assess performance in elite cyclists. *International Journal of Sports Medicine*, 31(3), 160–166.
- Pinot, J., & Grappe, F. (2011). The record power profile to assess performance in elite cyclists. *International Journal of Sports Medicine*, 32(11), 839–844.
- Quod, M. J., Martin, D. T., Martin, J. C., & Laursen, P. B. (2010). The power profile predicts road cycling MMP. *International Journal of Sports Medicine*, 31(6), 397–401.
- Rodríguez-Marroyo, J. A., Villa, G., García-López, J., & Foster, C. (2012). Comparison of heart rate and session rating of perceived exertion methods of defining exercise load in cyclists. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 26(8), 2249–2257. doi:10.1519/JSC.0b013e31823a4233
- Rusko, H. K. (1992). Development of aerobic power in relation to age and training in cross-country skiers. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 24(9), 1040–1047.
- Sassi, A., Marcora, S. M., Rampinini, E., Mognoni, P., & Impellizzeri, F. M. (2006). Prediction of time to exhaustion from blood lactate response during submaximal exercise in competitive cyclists. *European Journal of Applied Physiology*, 97(2), 174–180.
- Tucker, R., & Collins, M. (2012). What makes champions? A review of the relative contribution of genes and training to sporting success. *British Journal of Sports Medicine*, 46(8), 555–561. doi:10.1136/bjsports-2011-090548
- Vogt, S., Roecker, K., Schumacher, Y. O., Pottgiesser, T., Dickhuth, -H.-H., Schmid, A., & Heinrich, L. (2008). Cadence-power-relationship during decisive mountain ascents at the Tour de France. *International Journal of Sports Medicine*, 29(3), 244–250.
- Vogt, S., Schumacher, Y. O., Blum, A., Roecker, K., Dickhuth, -H.-H., Schmid, A., & Heinrich, L. (2007). Cycling power output produced during flat and mountain stages in the Giro d'Italia: A case study. *Journal of Sports Sciences*, 25(12), 1299–1305.
- Vogt, S., Schumacher, Y. O., Roecker, K., Dickhuth, -H.-H., Schoberer, U., Schmid, A., & Heinrich, L. (2007). Power output during the Tour de France. *International Journal of Sports Medicine*, 28(9), 756–761. doi:10.1055/s-2007-964982
- Weston, M., Gregson, W., Castagna, C., Breivik, S., Impellizzeri, F. M., & Lovell, R. J. (2011). Changes in a top-level soccer referee's training, match activities, and physiology over an 8-year period: A case study. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 6(2), 281–286.
- Woolles, A., Robinson, A., & Keen, P. (2005). A static method for obtaining a calibration factor for SRM bicycle power cranks. *Sports Engineering*, 8(3), 137–144. doi:10.1007/bf02844014

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

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

Résumé détaillé

Determination of Maximal Aerobic Power on the field in cycling

Pinot J et Grappe F

Etat de l'art : La PMA est une variable particulièrement intéressante à prendre en considération dans le processus d'entraînement en cyclisme. Plusieurs études ont montré la corrélation significative qui existe entre la PMA évaluée en laboratoire et la performance en cyclisme en CLM (Hawley et Noakes, 1992 ; Balmer *et al.*, 2000 ; Bentley *et al.*, 2001). Cependant, la PMA étant protocole-dépendante, il n'existe aucun protocole de référence pour la déterminer (Faria *et al.*, 2005). Seules deux études ont rapportés des tests d'évaluation sur le terrain pour l'évaluer, l'une à partir d'un test incrémental sur vélodrome (Gonzalez-Haro, Galilea, *et al.*, 2007) et l'autre à partir d'un test maximal sur le terrain de 4 min (Nimmerichter *et al.*, 2010). Les différents protocoles induisent des variations significatives du temps de maintien (T_{PMA}) (Bosquet *et al.*, 2002). Dans ce contexte, l'utilisation du PPR pourrait être un moyen approprié pour déterminer la PMA puisqu'il apporte plusieurs avantages : mesure de $P_{méca}$ sur le terrain, monitoring de l'entraînement et des compétitions ou encore inclusion de durées d'efforts maximales comprises entre 1 sec et 4h (Pinot J. et Grappe, 2011). En effet, en se basant sur le modèle de Peronnet et Thibault (Peronnet et Thibault, 1984 ; Peronnet *et al.*, 1987 ; Tokmakidis *et al.*, 1987), il est théoriquement possible d'évaluer le potentiel aérobie du cycliste à partir de la régression linéaire entre les $P_{méca}$ records et le logarithme du temps (\log_t). L'une des limites du modèle de Peronnet et Thibault réside dans le fait que T_{MAP} est considéré constant (7 min) pour tous les athlètes alors qu'en

cyclisme, il se situerait entre 3 et 6 min ((Billat *et al.*, 1996 ; Faina *et al.*, 1997 ; Bosquet *et al.*, 2002).

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

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

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

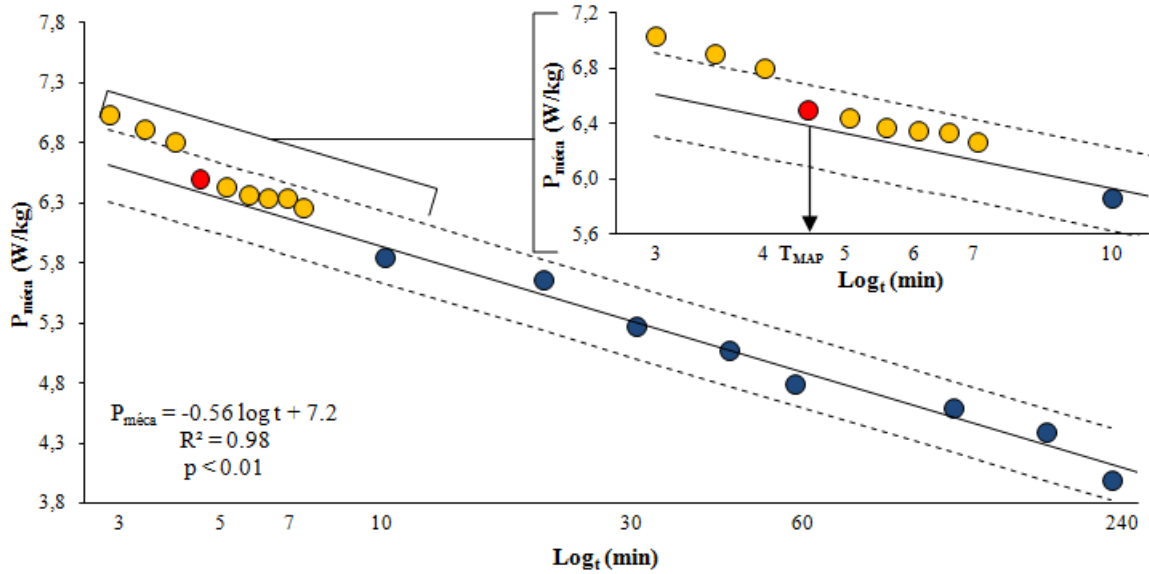


Figure 28 Méthodologie de détermination de PMA et T_{PMA} . La ligne continue représente la régression linéaire de la relation $P_{méca}$ record – \log_t entre 10 min et 4 h (bleu). Les lignes pointillées représentent les extrémités de l'intervalle de confiance équivalentes à 2 écarts-types résiduels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

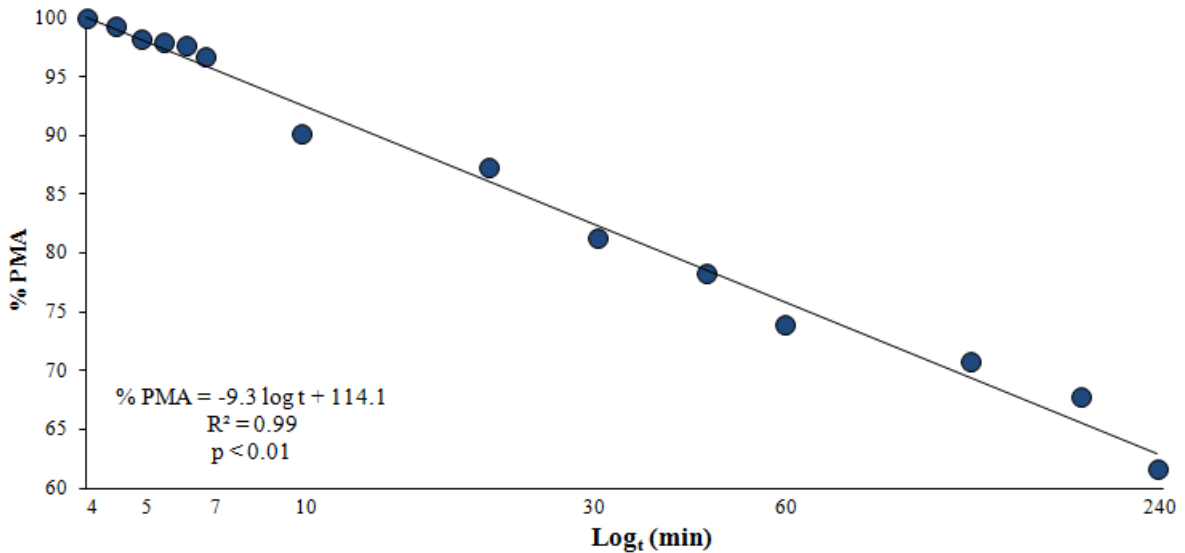


Figure 29 Relation % PMA – \log_t du même cycliste que dans la figure 28. La pente de cette relation détermine l'indice d'endurance aérobie (-9,3 pour ce cycliste)

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

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

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

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

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

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

Determination of Maximal Aerobic Power on the field in cycling

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

Abstract

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

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

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

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

² FDJ.fr Pro Cycling Team, France

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

Introduction

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

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

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



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

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

Materials and methods

Subjects

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

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

SRM Measurements

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

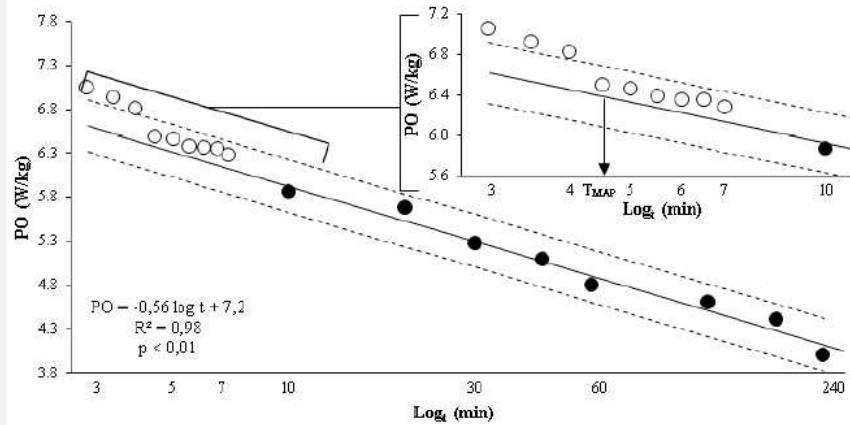


Figure 1. Methodology of determining MAP and T_{MAP} . Solid line represents the linear regression of the relationship between the record PO from 10 min to 4 h (black points) and Log_t . Dotted lines are residual 2-standard deviations of the regression. White points are record PO from 3 to 7 min, where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

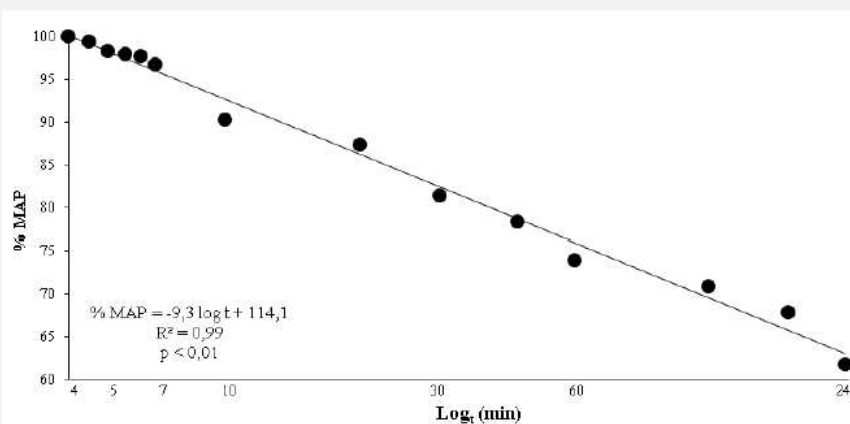


Figure 2. % MAP- Log_t relationship of the same cyclist as in Figure 1. The slope of the relationship determines the AEI (-9.3 for this cyclist)

has been verified before each analysis.

SRM Data analysis

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

Determination of MAP

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

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

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

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

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

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

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

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

confidence interval provides a

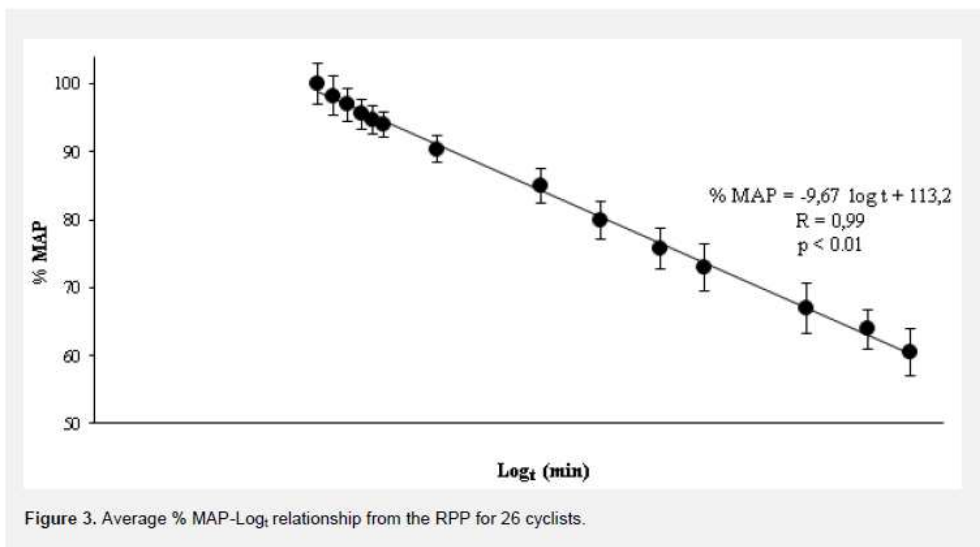


Figure 3. Average % MAP-Log_t relationship from the RPP for 26 cyclists.

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

Determination of Aerobic Endurance Index

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

Statistical analysis

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

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

Results

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

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

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

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

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

Discussion

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

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

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

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

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

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

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

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

Practical applications

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

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

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

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

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

Acknowledgment

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

Conflict of interest statement

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

References

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

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

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

Résumé détaillé

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Abstract

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

Key Words: Cycling, power output, field test.

Introduction

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

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

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

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

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

Methods

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

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

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

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

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

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

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

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

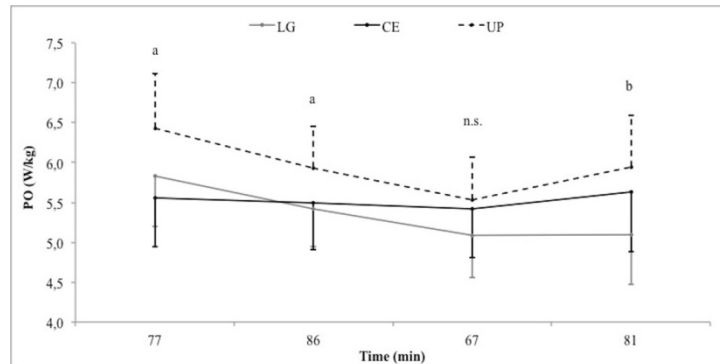
Results

Effect of cycling conditions on PO

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

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

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



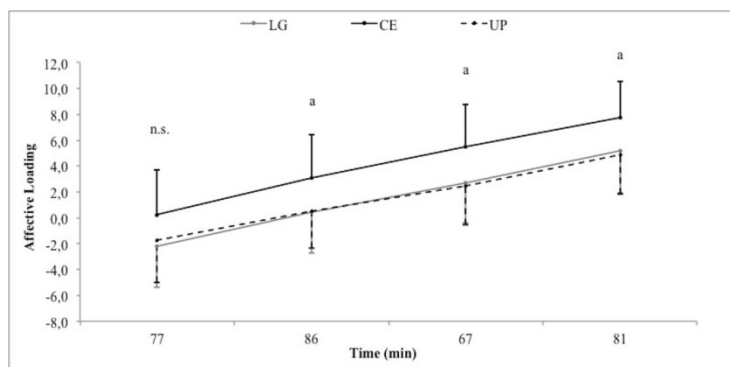
Effect of cycling conditions on heart rate and cadence

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

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

Effect of cycling conditions on affective load

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



Comparison between MAP test and various TT4 tests

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

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

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

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

Discussion

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

References

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Résumé détaillé

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

Pinot J, Candau R, Rinaldi K et Grappe F

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Medicine & Science in Sports & Exercise

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

--Manuscript Draft--

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

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

ABSTRACT

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

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

INTRODUCTION

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

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

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

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

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

METHODS

Subjects

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

Experimental design

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

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

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

Power output measurements

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

Kinematic arm measurements

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

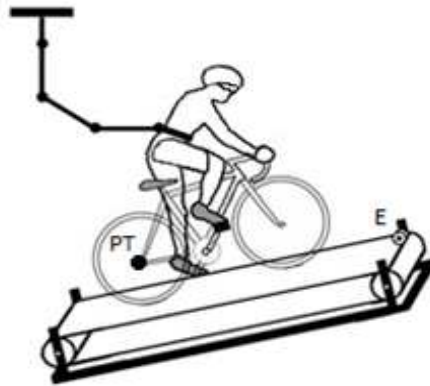


Figure 1: Illustration of the cyclist fitted with the kinematic arm around his waist on the treadmill; the caster *E* represents the extra optical encoder fixed to the wheel mounted on the treadmill belt and the PowerTap hub is schematized by the circle *PT* at the rear wheel.

Standing cycling trials

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

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

Quantification of the mechanical external power of CM

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Statistics

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

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

RESULTS

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

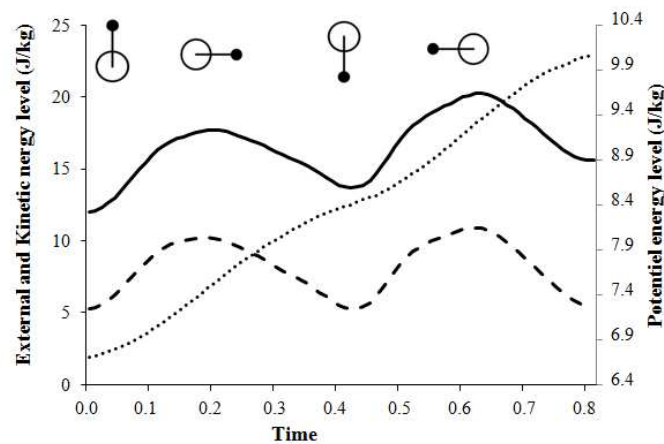


Figure 2: Example of the potential (dotted line), kinetic (dashed line), and external (solid line) energy levels during a pedal revolution at a slope of 9%.

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

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

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

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

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

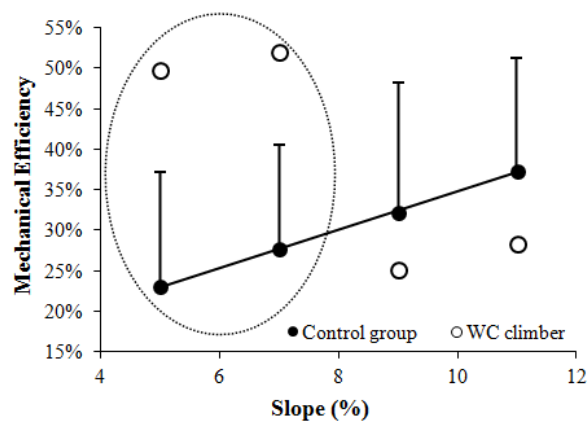


Figure 3: Relationships between the slope and the mechanical efficiency of the non-climber cyclists ($r = 0.99, p < 0.05$) and the WC climber ($r = -0.83, p = 0.16$). The dotted circle shows the ME in the slopes mainly observed in mountain ascents (5-7%)

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

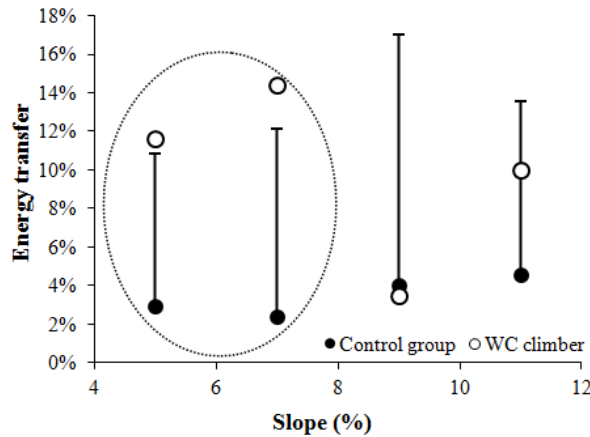


Figure 4: Relationships between the energy transfer index and the slope of the non-climber cyclists ($r = 0.84$, $p = 0.15$) and the WC climber ($r = -0.44$, $p = 0.55$). The dotted circle shows the ET in the slopes mainly observed in mountain ascents (5-7%)

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

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

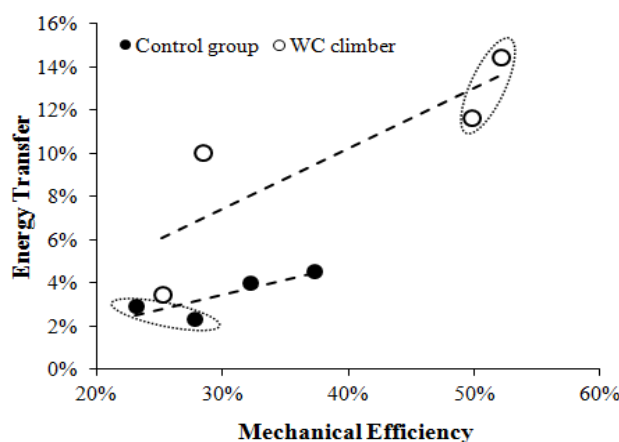


Figure 5: Relationships between the energy transfer index and the mechanical efficiency ($r = 0.84$, $p = 0.15$) for the non-climber cyclists and the WC climber. The dotted circle shows the ET and ME in the slopes mainly observed in mountain ascents (5-7%)

DISCUSSION

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

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

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

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

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

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

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

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

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

CONCLUSION

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

ACKNOWLEDGMENTS

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

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

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

REFERENCES

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

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

DISCUSSION

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

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

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

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

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

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

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

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

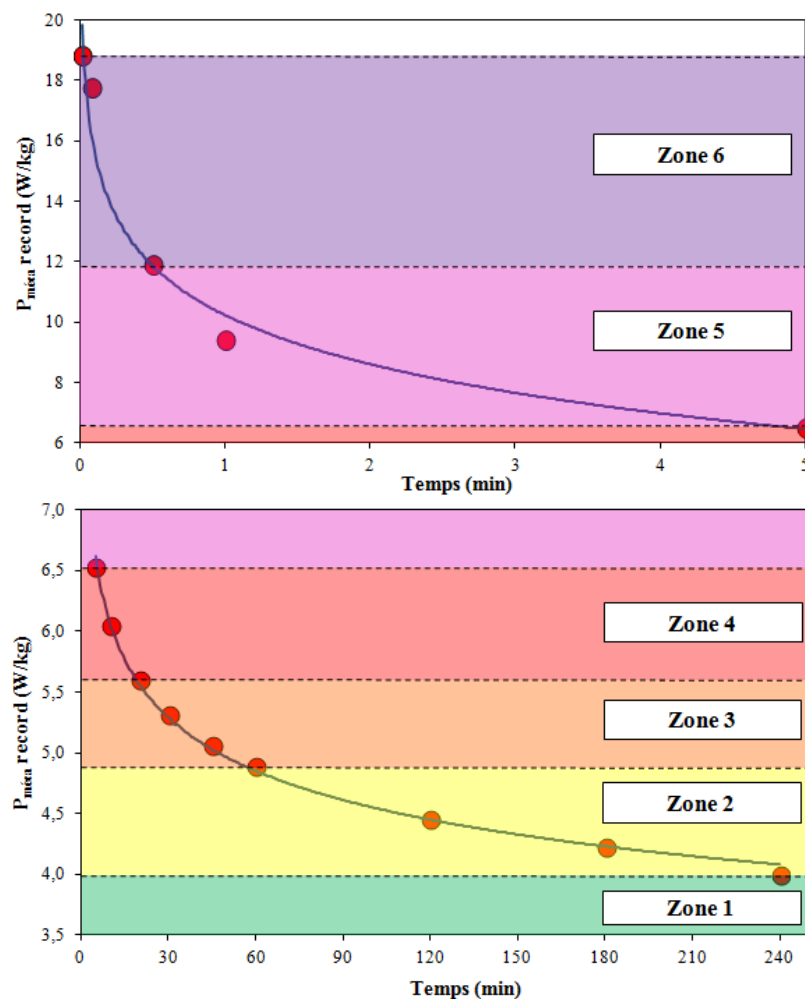


Figure 30 PPR d'un cycliste avec les différentes zones d'intensités délimitées par les $P_{méca}$ records correspondantes

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

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

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

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

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

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

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

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

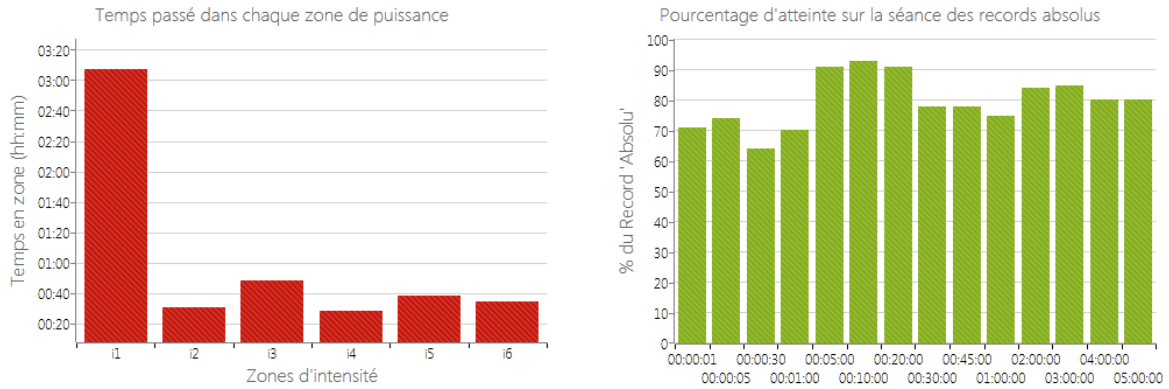
Le fait d'alterner les positions assis et danseuse a certainement un impact sur la production de $P_{méca}$ lors de l'effort en montée. En passant de la position assise à celle en danseuse, le bassin s'élève et s'avance pour ne plus être en appui sur la selle. Cette nouvelle posture modifie l'action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

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

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

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

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



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

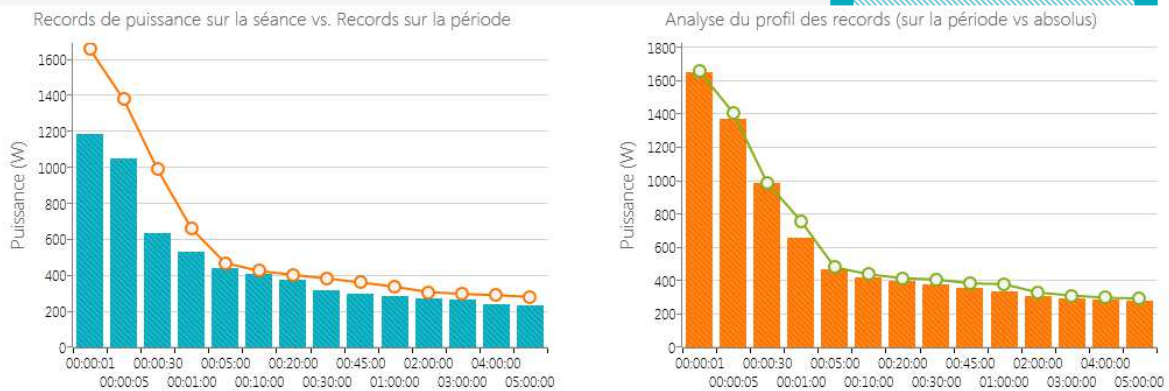


Figure 31 Statistiques d'une séance d'entraînement affichées lors de l'import d'un fichier SRM sur la plateforme web utilisée par les cyclistes de l'équipe FDJ

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

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

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

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

CYCLISME

Le capteur de mensonges

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

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

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

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

Un complément du passeport biologique

Le capteur de puissance, un SRM (Schoberer Rad Messtechnik) dans l'équipe FDJ, permet de mesurer la puissance développée par un coureur à chaque instant, à l'entraînement comme en course. En rassemblant toutes ces mesures, l'entraîneur recueille un maximum de données fiables sur la puissance développée sur une durée allant d'une seconde à cinq heures. Au fil des mois ou des ans, la courbe peut témoigner des progrès des coureurs. « Mon profil de puissance record, je le regarde tous les jours, explique Jeremy Roy, le coureur de la FDJ. Il me permet de me situer physiquement. » Mais il peut aussi trahir une transgression des règles. De façon simple, si le coureur réalise une performance nettement supérieure à ses records enregistrés, c'est probablement qu'il a triché... « Une variation trop importante d'un profil bien défini pourrait interpel-

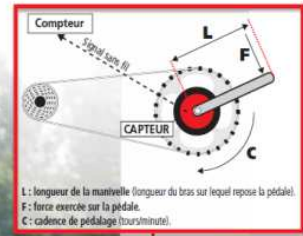
ler », dit Fred Grappe de façon plus diplomatique. Il est persuadé que son travail pourrait devenir un allié du passeport biologique, qui fonctionne de la même manière, mais pour les valeurs hématologiques. « Ce genre de test, couplé au passeport biologique, peut devenir un excellent outil de travail pour la lutte antidopage, souligne-t-il. En plus, mis à part le prix du capteur (de 1 000 à 3 500 euros), ce n'est pas cher. Le capteur de puissance est un outil de mesure sensible mais fiable. Il faut juste s'assurer de temps en temps du bon étalonnage du système (donc prévoir des contrôles inopinés des capteurs comme on organise aujourd'hui des contrôles inopinés sanguins ou urinaires). Ensuite, il faudrait croiser les données du passeport biologique avec le Profil puissance record. Malheureusement, aucune étude comparative n'a été faite jusqu'à présent. » Fred Grappe, tout comme Julien Pinot, frère de Thibaut et auteur d'un mémoire sur une nouvelle méthode d'analyse du potentiel physique du cycliste, reste persuadé qu'il est sur la bonne voie et que si les contrôles sanguins et urinaires sont indispensables, sa méthode pourrait s'imposer en complément. Il y a deux ans, à Lausanne, il a même été invité à débattre avec les scientifiques au moment de la mise en place du passeport biologique. « C'était une rencontre entre universitaires, explique-t-il. Mais c'est bien la preuve que ces chercheurs ont trouvé un certain intérêt à ce travail. »

La lutte antidopage y gagnerait en efficacité et le système présenterait aussi l'énorme avantage de responsabiliser davantage les équipes. « Aujourd'hui, avec un tel profil, les managers ne peuvent plus dire qu'ils ne savent pas lorsqu'un de leurs coureurs est pris pour dopage », insiste Fred Grappe. En adoptant un tel système de contrôle, on obligerait aussi les équipes à passer des déclarations de bonnes intentions à la mise en pratique de leurs résolutions. Hier, l'équipe Androni-Venezuela a apporté son soutien à l'initiative de la FDJ. Un nouvel élan ?

MANUEL MARTINEZ

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

Le capteur de puissance, comment ça marche ?



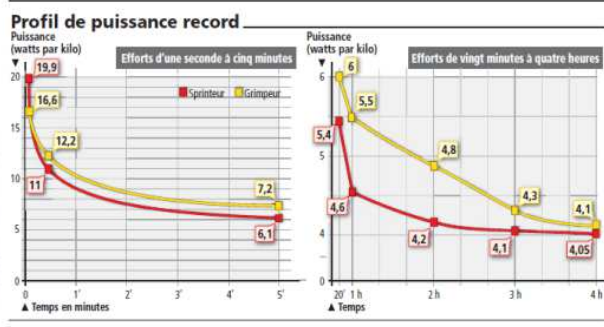
LE CALCUL DE « LA FORCE EFFICACE »

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

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

L'AMA cherche un outil universel

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



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

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

PARTIE 2 : OPTIMISATION DE L'INTERFACE

HOMME - MACHINE

L'originalité et la complexité de ce travail proviennent du cadre dans lequel nous nous situons lorsque nous cherchons à optimiser l'interface homme - machine dans une équipe cycliste professionnelle. Des contrats de partenariat et de sponsoring sont conclus entre l'équipe et différentes sociétés spécialisées dans la production et la commercialisation d'un équipement ou d'un accessoire. Le plus souvent, les différentes sociétés partenaires des équipes effectuent des recherches et développements (R&D) de leurs produits en interne avant de les fournir aux équipes, qui n'interviennent pas en amont avant l'utilisation en compétition. Le choix des sociétés partenaires s'effectue davantage sur la base de l'enveloppe financière proposée en échange de l'utilisation des produits fournis. Au cours des années 2000, le haut-niveau du cyclisme mondial étant devenu de plus en plus homogène et l'argent mis en jeu de plus en plus conséquent, les équipes ont progressivement pris conscience de l'importance que chaque détail est susceptible d'apporter pour l'amélioration de la performance sportive. Le fonctionnement des équipes professionnelles s'est petit à petit scientifié, dans un premier temps au niveau du processus d'entraînement avant de s'élargir à d'autres domaines d'optimisation tels que le matériel, la nutrition, les facteurs psychologiques de la performance, le management... Ainsi, la mission principale qui m'a été confiée dans ce projet de thèse porte sur l'optimisation de l'interface homme – machine en lien avec les différents partenaires techniques de l'équipe. L'originalité de cette démarche se trouve dans le fait de travailler en étroite collaboration avec les différents partenaires de l'équipe FDJ pour développer et améliorer les produits qu'ils fournissent à l'équipe. La première étape a consisté à expliquer et faire comprendre aux collaborateurs techniques la volonté de l'équipe de travailler en étroite collaboration avec eux sur leurs différents projets R&D. Les partenaires techniques avec lesquels j'ai travaillé dans ce travail de thèse sont les suivants :

- Lapiere : cadres course en ligne et contre-la-montre ;
- Shimano : roue – système de transmission ;
- Pro Bike Gear : accessoires périphériques (potence, cintre, tige de selle) ;
- Fiz'ik : selle ;
- Hutchinson (2012) puis Schwalbe (2013 – 2014) : pneumatiques ;
- Elite : bidon – Home trainer ;
- Moa (2012) puis B'twin (2013-2014) : vêtements textiles ;
- Uvex (2012 - 2013) puis Alpina (2014) : casques.

Parmi ces différentes sociétés, Shimano fait office de leader mondial dans le domaine des systèmes de transmission avec un département R&D basé au Japon. De ce fait, il était donc compliqué de travailler en collaboration avec eux sur des projets de développement.

Cependant, les représentants Shimano Europe se sont montrés à l'écoute de nos remarques et de nos idées pour orienter leur développement, notamment si nous leur apportions la preuve qu'un de leur produit pouvait être optimisé. En ce qui concerne les autres marques, la proximité et la volonté de nous fournir des produits performants furent des avantages pour entreprendre une collaboration R&D.

La deuxième partie de ma thèse présente la démarche méthodologique permettant d'optimiser l'interface homme – machine en collaboration avec les partenaires cités plus haut. Après un rappel sur les différentes résistances à l'avancement et les méthodes permettant de les quantifier, une revue de littérature présente dans un premier chapitre les publications scientifiques majeures traitant d'études sur l'optimisation du matériel et des équipements de l'ensemble cycliste - vélo. Nous détaillerons dans un second chapitre les méthodologies employées dans nos différents travaux entrepris au cours de ces trois dernières années avant d'en présenter les résultats dans les chapitres suivants.

INTRODUCTION

Lorsqu'il se déplace, le système cycliste - vélo lutte contre certaines forces qui s'opposent à son avancement. Plusieurs types de résistances sont générées : la traînée aérodynamique (R_a) qui représente la résistance de l'air contre le déplacement, la force de gravité (P) résultant du poids de l'ensemble cycliste - vélo en montée ou lors de phases d'accélération, la résistance au roulement (R_r) qui correspond au frein dû à la friction des roues sur le sol et les résistances dues aux frictions de l'ensemble des pièces mécaniques du vélo (R_f). Selon la vitesse et le terrain sur lequel le cycliste évolue, les proportions de ces trois résistances varient. Sur parcours plat à 50 km/h, 90 % de la puissance développée par le cycliste sert à lutter contre la traînée aérodynamique, alors que les 10 % restants servent essentiellement à combattre les résistances au roulement (Kyle, 1979 ; Kyle et Burke, 1984 ; Candau *et al.*, 1999 ; Debraux *et al.*, 2011). À l'inverse, plus la pente augmente, plus la part de la force de gravité va être prépondérante dans la puissance totale que le cycliste développe puisque la vitesse diminue (environ 75 % dans une pente à 5 %, 85 % dans une pente à 10 %). La résistance totale (R_T) qui s'oppose à l'avancement du coureur peut s'exprimer selon la formule (Millet *et al.*, 2013) :

$$R_T = R_a + P + R_r + R_f \quad (19)$$

Ainsi, la $P_{\text{méca}}$ produite par un cycliste correspond au produit de R_T par sa vitesse de déplacement (V_d) soit :

$$P_{\text{méca}} = R_T \cdot V_d \quad (20)$$

$$P_{\text{méca}} = (R_a + P + R_r + R_f) \cdot V_d \quad (21)$$

Par conséquent, les processus d'optimisation de la performance en cyclisme, au-delà de l'amélioration du potentiel physique du cycliste, ont pour objectif de diminuer au maximum ces quatre résistances afin de minimiser la $P_{\text{méca}}$ pour une vitesse donnée. Pour cela, il convient de minimiser 1) la traînée aérodynamique de l'ensemble cycliste - vélo en optimisant la position du cycliste et en améliorant la pénétration dans l'air des différents composants de cet ensemble, 2) la masse du cycliste et de son matériel, 3) les roulements des pneumatiques sur la surface du sol et 4) les frictions des différentes pièces mécaniques en rotation du vélo.

De nombreuses études se sont intéressées à l'optimisation de l'interface entre le cycliste et son vélo c'est-à-dire à la position, que ce soit sur le plan de l'efficacité, de la prévention des blessures, de l'aérodynamisme mais également sur les effets physiologiques d'une position optimale au niveau aérodynamique (McLean *et al.*, 1994 ; Grappe *et al.*, 1997 ; Grappe *et al.*, 1998 ; Jeukendrup et Martin, 2001 ; García-López *et al.*, 2008 ; Oggiano *et al.*, 2008 ; Fonda et Sarabon, 2010 ; Underwood *et al.*, 2011 ; Ferrer-Roca *et al.*, 2012 ; Ferrer-Roca *et al.*, 2014 ; Fintelman *et al.*, 2014). Des applications pratiques déduites de ces études ont été transférées sur les différents cyclistes de l'équipe FDJ. Des protocoles sur indoor trainer, vélodrome ou soufflerie ont été mis en place afin de déterminer leurs positions optimales sur les vélos de course en ligne et de CLM, en affinant avec chaque athlète ces règles générales de manière à obtenir le meilleur compromis, propre à chacun, entre efficacité, aérodynamisme et confort. Ce travail mené au sein de l'équipe FDJ depuis plusieurs années ne faisait pas partie des missions de recherche et d'optimisation qui m'ont été confiées pour ce travail de thèse.

Concernant la diminution du poids du matériel, nous avons orienté le choix des composants du vélo parmi les gammes de nos partenaires techniques en essayant d'obtenir cette fois le meilleur compromis entre aérodynamisme, poids et rigidité selon la spécificité des courses et des coureurs. La réglementation de l'Union Cycliste Internationale (UCI) imposant des normes sur l'ensemble du matériel utilisé, il convenait donc d'optimiser les différents éléments du vélo tout en restant dans ce cadre réglementaire : poids minimum de 6,8 kg, certification des cadres et des roues selon des normes de géométrie et de sécurité...

Au niveau de la réduction des résistances au roulement, la collaboration avec nos partenaires pneumatiques a eu pour objectif d'essayer d'améliorer les modèles de boyaux, que nous utilisons, afin d'obtenir le meilleur compromis entre rendement, adhérence et confort. Nous nous sommes également intéressés à l'influence des roulements céramiques, en comparaison aux roulements Shimano que nous utilisons, mais aucun gain significatif de diminution des frictions du système de transmission (boîtier de pédalier, chaîne, galets de dérailleurs) n'a été trouvé. Ces travaux, bien que participant à l'optimisation de la performance du système cycliste - vélo, ne seront pas détaillés dans ce manuscrit, étant donné qu'ils n'ont constitué que des études d'ordre secondaire.

Ainsi, ce travail de recherche et d'optimisation de la performance s'est principalement attaché à 1) diminuer la traînée aérodynamique du système cycliste - vélo à travers l'amélioration technique de certains équipements et composants matériels et 2) quantifier les gains aérodynamiques obtenus en terme de $P_{\text{méca}}$.

1. La traînée aérodynamique

1.1. Définition

L'étude de la dynamique des fluides est le terme général définissant l'étude des fluides en mouvement. L'aérodynamique est une science expérimentale visant à décrire ce qu'il se passe dans l'air. Par conséquent, l'étude aérodynamique de l'avancement du système cycliste - vélo s'intéresse à étudier les résistances de l'air à son avancement et à essayer de comprendre les écoulements autour de ce système.

La résistance aérodynamique de l'air sur un système possède deux composantes : la traînée, qui correspond à la force exercée dans le sens opposé du déplacement, et la portance, qui équivaut à la force contribuant à attirer le système vers le haut. Lorsqu'un cycliste se déplace, la portance est négligeable et c'est pourquoi, nous nous intéressons exclusivement à la traînée aérodynamique pour étudier les résistances de l'air sur l'avancement du cycliste.

L'air ayant une structure moléculaire, sa viscosité, qui dépend de paramètres tels que la température, la pression barométrique et l'humidité de l'air, conditionne la force de traînée opposée à l'avancement du système cycliste - vélo.

La viscosité de l'air autour de la surface de ce système provoque à sa proximité une zone de cisaillement qui est la couche limite. Cette couche limite correspond au volume d'air dans

lequel on retrouve un gradient de vitesse d'écoulement des particules d'air. Selon la forme, l'écoulement au sein de cette couche limite engendre une dissymétrie longitudinale des filets d'air mais surtout des remous à l'arrière du corps générateur d'une turbulence. Ainsi, on retrouve dans cette couche limite, des écoulements laminaires au début, avant une zone de transition qui amplifie cette couche limite entraînant ensuite des écoulements turbulents, comme décrit dans la figure 34.

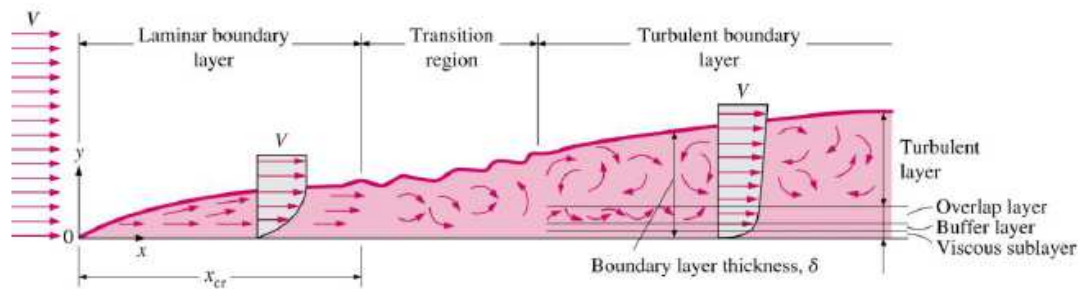


Figure 34 Schématisation des écoulements dans la couche limite avec la transition entre les écoulements laminaires et les écoulements turbulents (Granger, 1985)

Le nombre de Reynolds est une grandeur physique permettant d'expliquer l'écoulement à l'intérieur de la couche limite. Cet indice représente le rapport des forces d'inertie sur les forces de viscosité d'un objet qui se déplace dans un fluide (Hoerner, 1965). Le nombre de Reynolds conditionne les écoulements à l'intérieur de la couche limite en fonction de la vitesse et de la forme géométrique de l'objet. Plus le nombre de Reynolds d'un objet est grand, plus le sillage va être important et entraîner des décollements de l'écoulement. Le système cycliste - vélo étant composé d'une multitude de composants aux formes différentes, il n'existe donc pas un seul nombre de Reynolds pouvant caractériser ce système.

La force de traînée se décompose sous trois formes :

- Traînée de pression, dépendante de la forme géométrique du système et de ses composants. Elle résulte de la répartition des forces sur sa surface, notamment suite aux décollements de la couche limite qui provoquent des turbulences. Elle est donc dépendante du nombre de Reynolds.
- Traînée de frottement, directement due à la viscosité. Elle concerne la force tangentielle qui prend naissance aux endroits où l'air se déplace au voisinage de la surface du système. Cette traînée dépend de la rugosité des surfaces, mais également du nombre de Reynolds.

- Traînée induite, générée par interaction c'est-à-dire que chaque composant du système cycliste - vélo a une influence sur la traînée des autres composants.

La figure 35 présente des exemples de répartition des traînées de pression et de frottement autour d'objet de formes différentes.

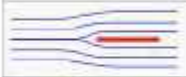
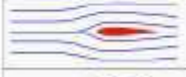
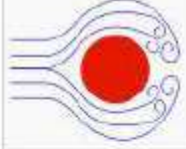
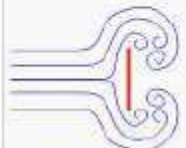
Shape and flow	Form drag	Skin friction
	0%	100%
	~10%	~90%
	~90%	~10%
	100%	0%

Figure 35 Exemples de la part de la traînée de pression et de frottement en fonction de l'écoulement et de la forme d'un objet ([http://en.wikipedia.org/wiki/Drag_\(physics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Drag_(physics)))

Toute la complexité de l'optimisation de l'aérodynamisme du système cycliste - vélo se trouve dans l'intégration de ces trois formes de traînées, étant donnée la multitude de composants aux formes différentes. Ainsi, la traînée de frottement est due à l'écoulement de l'air dans la couche limite sur les différentes surfaces du système (peau, combinaison, casque, vélo...) alors que la traînée de pression est d'avantage fonction de la forme et du fuselage des différents composants de ce système (Defraeye *et al.*, 2010a). Enfin, la traînée induite, qui correspond à l'interaction des traînées de pression et de frottement de tous ces composants, justifie le fait que l'aérodynamisme d'un composant ne peut être étudié en étant isolé des autres mais que c'est davantage l'interface entre chaque élément du système cycliste - vélo qu'il convient d'analyser.

1.2. Variables de la traînée aérodynamique

La traînée aérodynamique (R_a) se caractérise par l'équation :

$$R_a = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot C_x \cdot V_a^2 \quad (22)$$

Où ρ est la masse volumique de l'air (kg/m^3), S la surface frontale (m^2), C_x le coefficient de traînée aérodynamique et V_a la vitesse apparente de l'écoulement (m/sec).

- Masse volumique de l'air

Comme décrit précédemment, l'air étant le fluide dans lequel le système cycliste - vélo se déplace, ses propriétés définies par la température (T), l'hygrométrie et la pression barométrique (PB) vont directement influencer sur le déplacement de ce système dans l'air. Elle s'exprime selon l'équation :

$$\rho = \rho_0 \cdot \left(\frac{PB}{760}\right) \cdot \left(\frac{273}{T}\right) \quad (23)$$

Où ρ_0 est la masse volumique de l'air pour $PB = 760$ mmHg et $T = 273$ K, et donc, $\rho_0 = 1,293$ kg.m^{-3} .

- Vitesse de l'écoulement

Dans un environnement clos sans vent, la vitesse de l'écoulement de l'air sur l'ensemble cycliste - vélo est équivalente à la vitesse de déplacement. Le cyclisme étant un sport extérieur, le vent atmosphérique, selon son intensité et son orientation par rapport à la direction de l'avancement, influence donc l'écoulement de l'air sur cet ensemble. La vitesse du vent apparent (V_a) qui s'applique sur cet ensemble prend en considération la vitesse de déplacement (V_d) et la vitesse du vent atmosphérique (V_v) en fonction de son angle (β) par rapport au sens d'avancement. Ainsi, V_a s'obtient par l'équation :

$$V_a = \sqrt{V_d^2 + V_v^2 + 2 \cdot V_d \cdot V_v \cdot \cos \beta} \quad (24)$$

- Surface frontale

La surface frontale, dite projetée, correspond au maître couple, c'est-à-dire à l'aire projetée de l'ensemble cycliste - vélo sur un plan perpendiculaire à la direction de l'écoulement. En résumé, cela correspond à la surface de l'ensemble vue de face et, plus cette surface frontale est importante, moins l'aérodynamisme sera bon.

- Coefficient de traînée aérodynamique

Le coefficient de pénétration dans l'air (C_x) est un coefficient équivalent au profilage aérodynamique prenant en considération la forme de l'ensemble cycliste - vélo, autrement dit sa forme dans les différents axes, principalement dans le plan longitudinal. Il est dépendant du nombre de Reynolds du système qui se déplace et par conséquent, de la vitesse d'écoulement et de la rugosité de la surface. Il est important de souligner que la relation entre le C_x et la vitesse d'écoulement n'est pas linéaire puisqu'elle ne l'est pas entre le nombre de Reynolds et la vitesse d'écoulement.

La surface frontale effective équivaut au produit SC_x , surface frontale (S) - coefficient de traînée (C_x), et correspond au facteur cible à diminuer pour améliorer la pénétration dans l'air d'un système. Ainsi, l'objectif de ce travail d'optimisation de la performance à travers la diminution de la traînée aérodynamique a porté sur la diminution de la surface frontale effective de l'ensemble cycliste - vélo en améliorant certains composants de ce système.

2. Résistances dues au roulement et aux frictions mécaniques

2.1 Résistance au roulement

En cyclisme, la résistance au roulement (R_r) représente environ 10% des résistances totales à une vitesse de 50 km/h (Grappe, 2009). La force due aux résistances au roulement est dépendante de la force verticale appliquée sur les pneumatiques et du coefficient de roulement des pneumatiques (C_r) :

$$R_r = C_r \cdot m \cdot g \quad (25)$$

Où m (kg) est la masse de l'ensemble homme + vélo et g ($9,81 \text{ m}\cdot\text{sec}^{-2}$), l'accélération de la gravité.

Comme les vitesses sont relativement faibles en cyclisme, R_r est indépendant de la vitesse de déplacement étant donné qu'à moins de 100 km/h, l'impact de la vitesse sur R_r est négligeable.

Il convient de souligner que la principale source de résistance au roulement dans un pneumatique provient des pertes hystérétiques liées à la déformation du pneu au contact du sol. La magnitude de cette déformation détermine le coefficient de résistance au roulement du pneumatique. Ainsi, le C_r est directement dépendant du pneumatique et différentes variables l'influencent (Martin J. *et al.*, 1998 ; Candau *et al.*, 1999 ; Grappe *et al.*, 1999 ; Grappe, 2009 ; Lim *et al.*, 2011):

- Type de pneumatique : boyau, pneu ou tubulless.
- Dimension : section du pneumatique généralement compris entre 19 et 28 mm.
- Pression de gonflage : la pression de l'air à l'intérieur des pneumatiques influe directement sur la surface de contact avec le sol. Plus la pression de gonflage est faible, plus la surface de frottement au sol est importante et donc plus R_r augmente.
- Epaisseur de la chape : plus l'épaisseur de la gomme est importante, plus la déformation est élevée, ce qui augmente les pertes hystériques.
- Nature de la gomme : propriétés du caoutchouc utilisé.
- Structure de la chape : lisse, striée, rugueux...
- Ellipse de contact : surface de contact du pneumatique sur le sol. Elle est directement en lien avec la dimension du pneumatique et la pression de gonflage.
- Nature du sol : revêtement du bitume, plus ou moins lisse, rugueux, compacte...
- Température : elle agit directement sur les propriétés de déformation du caoutchouc et par conséquent sur les pertes hystériques.

2.2. Résistances dues aux frictions mécaniques

Lorsque le cycliste pédale, différents éléments du vélo sont en rotation : les roues, les pédales, le pédalier, la chaîne et les galets du dérailleur. Ainsi, il existe des pertes de friction dues aux frottements des roulements présents dans chacun de ces éléments (R_f). Seules les études de Martin *et al.* et Dahn *et al.* mentionnent ces pertes dues aux frictions des différents roulements en rotation lors de l'avancement (Dahn *et al.*, 1991 ; Martin J. *et al.*, 1998). En fonction de la puissance transmise, ces pertes sont plus ou moins importantes et une société indépendante a montré qu'elles peuvent représenter jusqu'à 8% de la $P_{méca}$ totale selon le choix et la lubrification des différentes pièces (Velofacts, 2014).

3. Méthodes de mesure des résistances aérodynamiques

Différentes méthodologies existent pour quantifier la traînée aérodynamique, que ce soit en conditions réelles de locomotion, en laboratoire ou encore à l'aide d'outils numériques (Lukes *et al.*, 2005 ; Grappe, 2009 ; Debraux *et al.*, 2011). L'objectif commun de toutes ces méthodologies va être d'isoler et d'estimer un des principaux facteurs influençant ces deux résistances, c'est-à-dire la surface frontale ou le coefficient de pénétration dans l'air (ou le

produit des deux, équivalent à la surface frontale effective). Chaque technique possède ses avantages et ses inconvénients avec des protocoles et des coûts plus ou moins conséquents.

3.1 La soufflerie

La soufflerie peut être considérée comme un laboratoire d'essais de mesure de la résistance aérodynamique. Dans une soufflerie, le vent est artificiellement créé par des hélices puis projeté sur l'ensemble cycliste - vélo. Différentes configurations de soufflerie existent, à circuit ouvert ou fermé, mais toutes comportent une veine d'essai avec une balance de force mesurant la résistance du système testé contre l'écoulement du vent (figure 36). La résistance mesurée correspond à la traînée aérodynamique du système testé, ce qui permet de quantifier de manière précise sa surface frontale effective.

De nombreux articles scientifiques ont porté sur l'utilisation de cette technique en cyclisme, bien qu'elle reste très coûteuse et donc peu utilisable en routine (Kyle et Burke, 1984 ; Martin J. *et al.*, 1998 ; Lukes *et al.*, 2005 ; García-López *et al.*, 2008 ; Gibertini *et al.*, 2010 ; Chabroux V. *et al.*, 2011 ; Debraux *et al.*, 2011 ; Gibertini *et al.*, 2011). Cependant, comme pour tout appareil de mesure, elle possède certaines limites. En effet, la sensibilité de la balance de mesure peut entraîner des dérives dans les estimations de SCx si l'athlète effectue trop de mouvements parasites entre les essais ou si les roues sont légèrement voilées et non équilibrées. Certaines différences dans le protocole de mesure existent selon la configuration de la veine d'essai et peuvent entraîner certains biais méthodologiques altérant la précision et la reproductibilité des mesures réalisées :

- le vélo peut être installé sur un home trainer, sur un tapis roulant ou sur des roulettes motorisées ;
- les roues peuvent être stationnaires ou mises en mouvement par le pédalage ou un système motorisé ;
- le cycliste peut être immobile ou pédaler, dans le vide ou contre une résistance ;
- la balance de force peut être surélevée ou non du sol, ce qui modifie le flux d'air autour du vélo au niveau du sol



Figure 36 Veine d'essai de la soufflerie de Magny-Cours avec l'ensemble cycliste - vélo positionné sur la balance de force

Nous reviendrons plus en détail dans le chapitre suivant sur l'utilisation de cette méthode à des fins d'optimisation de la traînée aérodynamique du système cycliste - vélo.

3.2 Mesure de la $P_{\text{méca}}$ en condition réelle de locomotion

3.2.1 Méthode d'analyse de régression linéaire

En conditions réelles de locomotion, sur un terrain plat et à vitesse constante, la résistance totale à l'avancement (R_T) est composée uniquement de la traînée aérodynamique, de la résistance au roulement et des frictions mécaniques (R_f) (Millet *et al.*, 2013).

D'où :

$$R_T = R_a + R_r + R_f = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot C_x \cdot V_a^2 + C_r \cdot m \cdot g + R_f \quad (26)$$

Comme vu précédemment (équation 20):

$$P_{\text{méca}} = R_T \cdot V_a$$

Ce qui équivaut à :

$$R_T = \frac{P_{\text{méca}}}{V_a} \quad (27)$$

On obtient donc :

$$R_T = a \cdot V_a^2 + b \quad (28)$$

avec $a = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot C_x$ et $b = C_r \cdot m \cdot g + R_f$

Ainsi, la mesure de la $P_{\text{méca}}$ produite par un cycliste dans ces conditions (sans vent, sur terrain plat), à différentes vitesses, permet de déterminer la relation linéaire qui existe entre les résistances totales et le carré de la vitesse de déplacement. L'obtention de cette relation autorise l'estimation de la surface frontale effective et du coefficient de roulement. Grappe *et al.* (1997) et Lim *et al.* (Lim *et al.*, 2011) ont validé scientifiquement cette méthode respectivement sur vélodrome et sur le terrain. Elle offre l'avantage de s'effectuer en conditions réelles de locomotion avec comme seule obligation celle d'utiliser un capteur de puissance valide.

3.2.2 Modèle mathématique

Garcia-Lopez *et al.* (2014) ont utilisé le modèle mathématique élaboré par Martin *et al.* (Martin J. C. *et al.*, 2006) pour estimer la surface frontale effective de l'ensemble cycliste - vélo à partir de la mesure de la $P_{\text{méca}}$ à une vitesse constante sur vélodrome. Pour cela, il est nécessaire de connaître les différents paramètres de ce modèle permettant ensuite d'estimer la surface frontale effective :

$$P_{\text{méca}} \cdot E = SC_x \cdot \frac{\rho \cdot V_a^3}{2} + \mu \cdot (V_a \cdot m \cdot g) \quad (29)$$

Où, E correspond à l'efficacité du système de transmission de la chaîne, fixé à 97.7 % (Martin J. et al., 1998) et μ un coefficient de roulement global (comprenant les résistances dues au roulement et aux frictions mécaniques), qui est fixé à 0.0025 dans l'étude de Garcia-Lopez et al. (2014) à partir des résultats obtenus par Martin et al. sur vélodrome (2006).

Cette méthode a ainsi été validée par Garcia-Lopez *et al.* (2014) sur vélodrome avec des cyclistes professionnels en ayant démontré une forte corrélation avec les résultats obtenus en soufflerie.

Il convient de noter qu'il est également possible avec ce modèle mathématique de raisonner avec la méthode précédente d'analyse de la régression linéaire si l'on souhaite estimer la surface frontale effective et/ou le coefficient de roulement global.

3.3 Mesure de dynamométrie

Di Prampero *et al.* (1979) et Capelli *et al.* (1993) ont montré qu'il était possible d'évaluer la traînée aérodynamique et la résistance au roulement par le remorquage d'un cycliste derrière un véhicule. La résistance nécessaire pour tracter l'ensemble cycliste - vélo à une vitesse constante est mesurée à l'aide d'un dynamomètre et permet également de déterminer la relation entre la résistances totale et le carré de la vitesse de déplacement. De la même manière que pour la méthode de régression linéaire vue précédemment, il devient possible de quantifier la surface frontale effective et le coefficient de résistance au roulement avec cette technique. Toutefois, certaines limites pouvant affecter les résultats se situent au niveau de l'influence de la traînée induite par le véhicule qui tracte le cycliste et des conditions atmosphériques qui sont difficilement stables dans un milieu extérieur.

Avec une technique similaire, Henchoz *et al.* (2010) ont montré qu'il était possible d'estimer le coefficient de roulement de pneumatiques en plaçant l'ensemble cycliste - vélo sur un tapis roulant. Un dynamomètre mesurait la résistance nécessaire pour maintenir en équilibre le cycliste sur le tapis roulant à une certaine vitesse avec une pente donnée (figure 37). Le coefficient de résistance au roulement peut ainsi être isolé et estimé en connaissant les différentes variables (poids de l'ensemble cycliste - vélo, vitesse et pente).

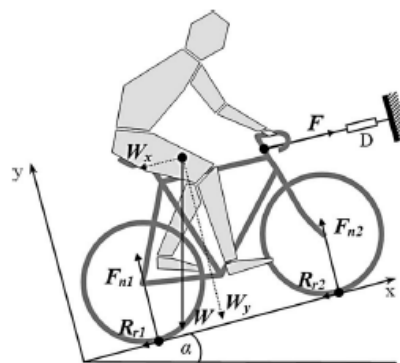


Figure 37 Représentation schématique de la mesure par dynamométrie du coefficient de résistance au roulement de l'ensemble cycliste - vélo sur tapis roulant (Henchoz *et al.*, 2010)

3.4 Méthode de décélération

Cette méthode de mesure de la traînée aérodynamique et des résistances au roulement est basée sur la seconde loi de Newton, qui relate que la somme des forces totales soumises à un système en mouvement est égale au produit de sa masse par son accélération. Ce type de test se réalise soit en descente (Kyle et Burke, 1984), soit sur terrain plat (Candau *et al.*, 1999). Dans les deux méthodes, le cycliste se lance à une certaine vitesse avant d’être en roue libre sur une distance donnée où l’on étudie sa décélération.

La méthode « américaine » comprend six bandes de pression chronométriques espacées de 6 m qui permettent de calculer les vitesses moyennes entre chaque bande (Kyle et Burke, 1984). La régression linéaire entre la vitesse moyenne et la distance permet de calculer la décélération moyenne utile pour estimer les résistances totales. Ainsi, il devient possible de calculer la traînée aérodynamique et les résistances au roulement à partir de la relation entre les résistances totales et le carré de la vitesse (équation 28).

La méthode « française » de décélération sur terrain plat comprend trois bandes de pression chronométrique (figure 38). Les deux premières bandes sont séparées de 3 m, afin de déterminer la vitesse initiale, et les deux dernières sont espacées de 20 m, afin de déterminer une vitesse de décélération moyenne. Une vingtaine d’essais sont nécessaires pour tester une condition (une position ou un pneumatique) avec différentes vitesses initiales. La surface frontale effective et le coefficient de résistance au roulement sont estimés par une méthode mathématique par itérations. Le modèle ajuste ces deux variables pour minimiser la somme des écarts des moindres carrés entre la distance réelle mesurée (20 m) et la distance prédite calculée par le modèle empirique (Candau *et al.*, 1999). Les résultats obtenus avec cette méthode s’avère sensible, valide et reproductible.

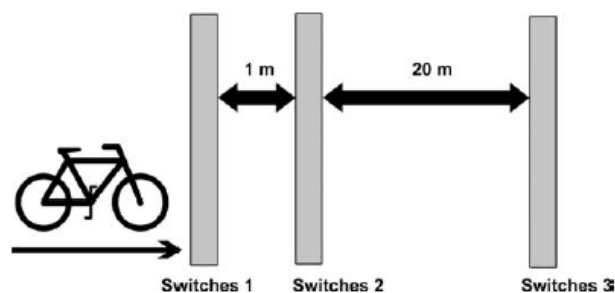


Figure 38 Schéma du système de mesure de la méthode de décélération avec le placement des bandes de chronométrage comme décrit par Candau *et al.* (1999) (Schéma tiré de Debraux *et al.* (2011))

3.5 Mesure de la surface frontale

Bien que la surface frontale effective soit le paramètre principal d'évaluation de la traînée aérodynamique du système cycliste - vélo, il convient de relever qu'il existe des méthodes relativement simples et peu coûteuses permettant d'estimer la surface frontale projetée. Ainsi, le calcul de cette surface frontale peut donner une première information de l'aérodynamisme du système cycliste - vélo (Debraux *et al.*, 2011).

3.5.1 Pesée des photographies

Cette méthode consiste à prendre une photographie du plan frontal de l'ensemble cycliste – vélo et d'une surface de calibration placée au niveau du cycliste, dont l'aire est connue. Il s'agit ensuite de découper le cadre de calibration et l'ensemble cycliste - vélo puis de peser ces deux pièces sur une balance précise et très sensible ($\pm 0,001$ g). La surface frontale projetée peut ainsi être calculée en multipliant l'aire connue de la surface de calibration par le ratio du poids de l'image de l'ensemble cycliste - vélo sur le poids de l'image représentant la surface de calibration (Olds *et al.*, 1995 ; Heil, 2001 ; Debraux *et al.*, 2009).

3.5.2 Planimétrie

Cette méthode, validée par Olds et Olive (1999), utilise un planimètre polaire pour tracer les contours du système cycliste - vélo afin de calculer l'aire par triangulation.

3.5.3 Digitalisation

La méthode de digitalisation est une méthode numérique qui permet de calculer l'aire de l'ensemble cycliste - vélo grâce à l'utilisation d'une zone de calibration, avec la même démarche que le pesage des photographies (Heil, 2001 ; Debraux *et al.*, 2009). Des logiciels informatiques permettent de calculer le nombre de pixels de zones délimitées sur des photographies numériques. Ainsi, il devient possible de calculer la surface frontale projetée réelle de l'ensemble cycliste - vélo en multipliant l'aire connue de cette surface de calibration par le ratio de pixels entre l'ensemble cycliste - vélo et cette surface de calibration (figure 39).

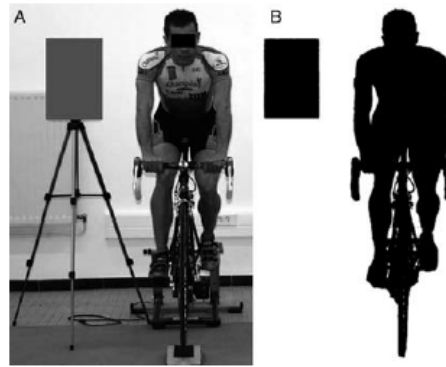


Figure 39 Illustrations d'une photographie utilisée pour estimer la surface frontale effective à partir de la méthode de pesée des photographies (A) et de la méthode de digitalisation (B)(Debraux *et al.*, 2011)

3.6 Modélisation numérique de la mécanique des fluides (CFD)

Depuis une vingtaine d'années, la modélisation numérique de la mécanique des fluides (CFD : Computational Fluid Dynamics en anglais) est utilisée dans l'ingénierie industrielle dans le domaine du sport (Hanna K. R., 2002 ; Hanna R. K., 2012). La CFD a commencé par être utilisée dans le sport au début des années 1990 par les écuries de Formule 1 et les équipages à la voile de la Coupe de l'Amérique. Cette méthode consiste en une série de calculs effectués par des processeurs qui reproduisent un phénomène physique. Dans le cyclisme, la méthode CFD a été comparée à la soufflerie par Defraeye *et al.* (2010a) qui ont montré une forte concordance dans les valeurs de traînée aérodynamique obtenues. Ils ont ainsi démontré que la CFD était une alternative valable pour évaluer l'aérodynamisme de différentes positions avec une précision suffisante pour détecter l'influence de petits ajustements. Le principal avantage de la CFD est de fournir des informations sur l'écoulement du flux d'air autour du système cycliste - vélo, ce qui permet une meilleure compréhension de la traînée aérodynamique puisqu'il est possible de décomposer l'influence de chaque partie du vélo et du cycliste. En effet, toutes les méthodes énoncées précédemment ne permettent pas de définir l'impact précis de chacun des différents composants dans l'aérodynamisme global.

Depuis 5 ans, plusieurs études utilisant cette technique ont été publiées que ce soit sur l'optimisation de la position (Defraeye *et al.*, 2010b, 2011a ; Blocken *et al.*, 2013 ; Defraeye *et al.*, 2013) ou du matériel (Godo *et al.*, 2009, 2010, 2011). La CFD permet donc la recherche et le développement de nouveaux matériels mais également une meilleure compréhension de la pénétration dans l'air du système cycliste - vélo, particulièrement sur l'interaction très complexe entre le cycliste et son vélo (figure 40).

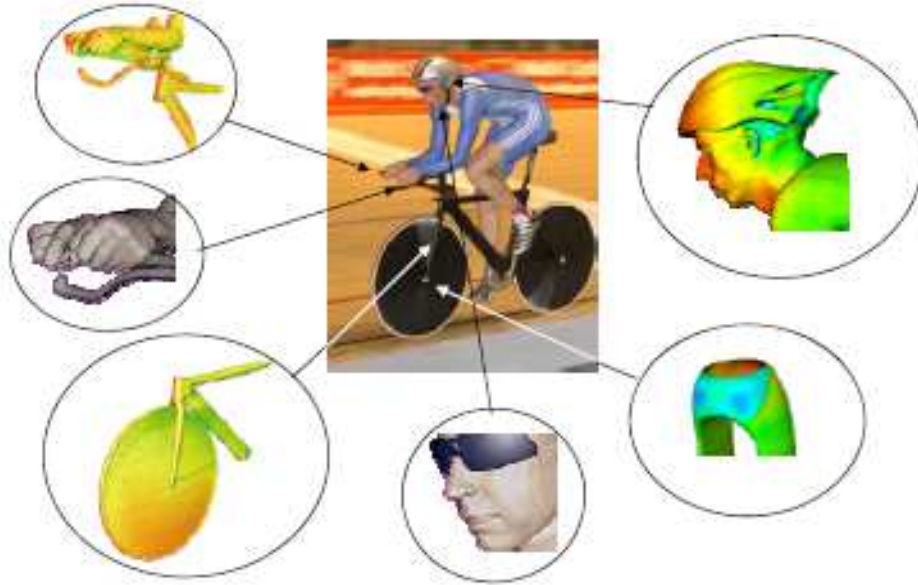


Figure 40 Exemple d'application de la méthode CFD en cyclisme par l'équipe britannique olympique (Obtenu par UK Sport, Université de Sheffield et Totalsim Ltd avec le logiciel ANSYS FLUENT) (Hanna R. K., 2012)

Nous reviendrons plus en détail sur l'utilisation et les détails de cette méthodologie dans le chapitre suivant.

4. Etudes aérodynamiques des différents composants du système cycliste - vélo

Depuis l'organisation de la première course cycliste en 1869, les évolutions technologiques et les réglementations ont été nombreuses pour aboutir aux vélos utilisés dans les pelotons actuels. Ces évolutions ont d'abord tourné autour de l'ergonomie et du confort : transmission par chaîne (1880), pneumatiques (1891), roue libre (1895), dérailleur (créé en 1895 mais autorisé sur le tour de France seulement en 1937). Dans le même esprit, les positions adoptées jusque dans les années 1940 se justifiaient davantage par la recherche de confort, qu'à travers la quête de gain aérodynamique. Un des premiers chercheurs sur l'aérodynamisme en cyclisme fut Nonweiler (Nonweiler, 1956), qui fit prendre conscience de l'importance de ce paramètre dans la performance. Il faut ensuite attendre les années 1980 et les nombreux travaux de Kyle pour observer une véritable avancée sur les positions et le matériel utilisé dans les épreuves contre-la-montre (Kyle et Burke, 1984). C'est alors que les premiers cadres avec des formes profilées sont apparus, tout comme les roues paraculaires, les cintres "cornes de vache" ou les premiers casques aérodynamiques, qui permirent d'adopter des positions favorisant la pénétration dans l'air. Le meilleur exemple restera le Tour de France 1989 qui se joua également sur une avancée technologique, puisque Greg Lemond utilisa pour la première fois dans le cyclisme un guidon de triathlon qui lui permit de prendre l'avantage sur Laurent Fignon de quelques secondes pour la victoire finale lors d'un CLM. Le nombre de recherches au niveau aérodynamique se multiplia dans les années 1990 (Zdravkovich, 1992 ; Capelli *et al.*, 1993 ; Hill R., 1993 ; Sayers et Stanley, 1994 ; Lukes *et al.*, 2005). On observa des positions adoptées par certains coureurs (Obree, Boardman) poussées à l'extrême dans la recherche d'aérodynamisme, ainsi que des machines n'ayant en commun avec les vélos traditionnels que le fait d'avoir une selle, un cintre et un pédalier (les deux roues étant de diamètres différents). C'est alors qu'en 2000, la Fédération internationale légiféra en définissant des normes strictes pour tous les types de matériels susceptibles d'être utilisés en compétition (cadre, roues, casque, etc.), ainsi que pour les positions, ceci dans le but de préserver l'égalité des chances entre les participants et d'affirmer la primauté de l'homme sur la machine.

En moyenne, la traînée aérodynamique totale est répartie au 2/3 sur le corps du cycliste et 1/3 sur le vélo (Kyle et Burke, 1984 ; Lukes *et al.*, 2005 ; Defraeye *et al.*, 2010a ; Underwood et Jermy, 2011) (figure 41). La revue de littérature suivante porte sur les publications scientifiques faisant état de recherches aérodynamiques au niveau de l'optimisation du

matériel et des équipements du système cycliste - vélo majoritairement depuis l'instauration du règlement de la fédération internationale sur le matériel et les équipements (2000). La majeure partie des applications des recherches sur le plan aérodynamique est orientée sur la discipline du CLM où l'objectif est d'accomplir seul (à l'exception des CLM par équipe) une distance dans un temps le plus court possible. Comme expliqué précédemment, notre travail s'est porté majoritairement sur l'optimisation du matériel et des équipements (principalement dans la discipline du CLM) ; la position et l'interface entre le l'homme et sa machine étant gérés par ailleurs au sein de l'équipe FDJ. Il convient de souligner que le faible nombre de publications relatives à l'optimisation du matériel et des équipements s'explique en raison de la confidentialité des travaux R&D menés par les différentes sociétés du cycle au vu de la forte concurrence du marché.

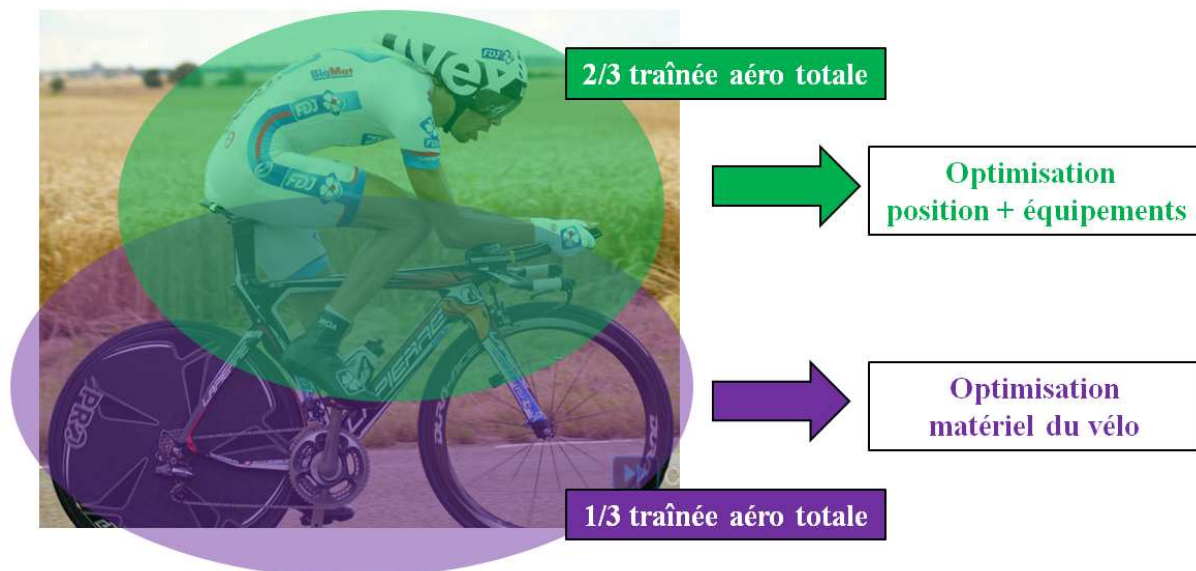


Figure 41 Schématisation de la répartition de la traînée aérodynamique totale sur l'ensemble cycliste - vélo

4.1 Équipements

Comme évoqué précédemment, le corps du cycliste représente les 2/3 de la traînée aérodynamique totale du système cycliste - vélo. La diminution de la résistance aérodynamique du corps peut s'obtenir en agissant sur deux paramètres : la position ou les équipements du cycliste (Brownlie *et al.*, 2009).

A partir de l'étude CFD d'un cycliste dans plusieurs positions sur son vélo, Defraeye *et al.* (2011a) ont décomposé la traînée aérodynamique de chaque segment du corps (figure 42). En

position de CLM, les valeurs les plus importantes étaient logiquement obtenues avec la tête (19%), les jambes (45%) et les bras (14%) puisqu'ils composent la majeure partie de la surface frontale. Avec la position de CLM très profilée, la part de la tête devient plus importante que celle des bras puisque dans cette position, les avant-bras étant horizontaux, ils offrent moins de traînée à l'air. Cependant, il convient de noter que dans les études CFD les membres inférieurs étant immobiles, cela induit une limite dans l'interprétation des résultats. L'évaluation objective et visuelle de la traînée des différents segments du corps par le biais de la CFD est intéressante afin de mieux comprendre les phénomènes aérodynamiques associés pour ensuite optimiser les équipements, en jouant sur la forme et la nature des éléments qui les composent. En effet, le casque, au-delà de sa fonction protectrice, doit permettre de diminuer au maximum la traînée de la tête et la combinaison doit améliorer l'écoulement du flux d'air sur les différents segments du corps (bras, buste et cuisses).

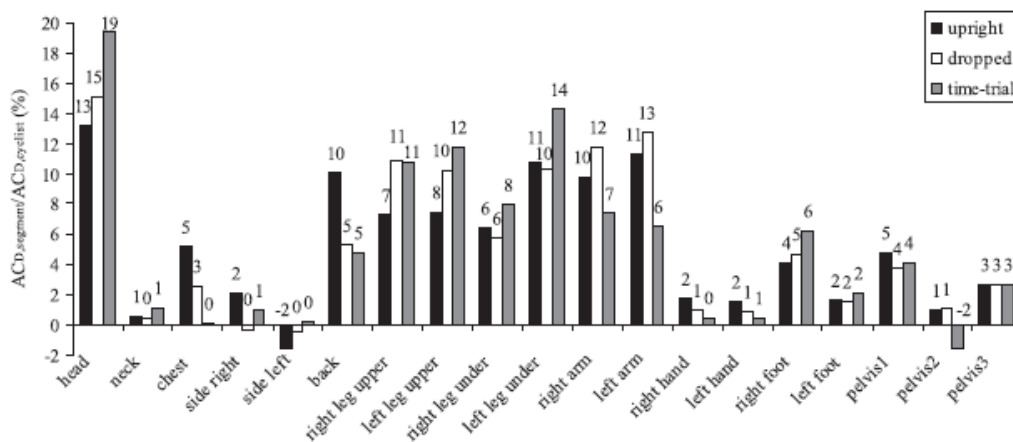


Figure 42 Pourcentage de la traînée des différents segments du corps de plusieurs cyclistes dans 3 positions différentes (Defraeye et al., 2011a)

Kyle fut parmi les premiers à démontrer que les équipements vestimentaires du cycliste étaient importants pour améliorer la pénétration dans l'air en testant différents types de combinaisons en lycra (Kyle et Burke, 1984). Au cours des années 2000, Nike a réalisé un important travail R&D pour optimiser la combinaison de CLM sous la direction de Kyle et Brownlie (Brownlie et al., 2009). Les auteurs expliquent que les équipements du cycliste peuvent réduire sa traînée aérodynamique en diminuant les traînées de pression et de frottement sur sa surface. En effet, selon l'angle d'attaque des écoulements de l'air sur la forme des différents segments, la traînée peut être, de pression ou de frottement. Sur les segments cylindriques comme les membres supérieurs et inférieurs où l'écoulement est

transversal, on observe davantage une traînée de pression. A l'inverse, sur les segments du corps parallèle à l'écoulement comme le buste ou les avant-bras, la traînée de frottement prédomine. Le règlement UCI interdisant de 1) porter des combinaisons modifiant la forme des segments corporels et 2) énonçant que l'équipement vestimentaire ne peut être fabriqué qu'à partir d'un « matériau textile » composé de fibres ou de fils dont la structure est celle d'un « tissu » avec des mailles ouvertes (règlement UCI, Art. 1.3.033), il est seulement possible d'intervenir sur la rugosité de la surface de la combinaison et sur son ajustement pour diminuer la traînée. Ainsi, plusieurs études ont montré qu'il était possible de réduire la traînée aérodynamique du cycliste d'une part, avec une combinaison taillée sur-mesure moulant le corps et permettant d'éviter les plis (Lukes *et al.*, 2005 ; Brownlie *et al.*, 2009 ; Underwood et Jermy, 2011), et d'autre part en différenciant la texture du textile de la combinaison selon les différents segments du corps (Lukes *et al.*, 2005 ; Brownlie *et al.*, 2009 ; Chowdhury *et al.*, 2010 ; Moria *et al.*, 2012). Par conséquent, au niveau des surfaces où la traînée de pression prédomine (bras), une surface rugueuse peut avoir un impact sur l'écoulement de la couche limite et donc influencer sa vitesse ainsi que l'écoulement transitoire, responsable des décrochages et des turbulences. Au niveau des surfaces où l'on observe davantage une traînée de frottement (buste ou avant-bras), plus la surface est lisse plus elle permet d'atténuer les forces de cisaillement, provoquées par les molécules d'air qui peuvent s'adhérer et nuire à son écoulement. Enfin, sur les segments où l'écoulement est totalement séparé, c'est-à-dire les zones de faibles pressions et vitesses d'écoulement comme le bas du dos, l'arrière des bras et des jambes, la texture de la surface n'a pas d'incidence sur l'écoulement donc la nature du textile importe peu à ces endroits.

Brownlie *et al.* (2009) ont démontré lors des 5 années de développement de la combinaison Nike Swift Spin avoir diminué de 8% la traînée totale de l'ensemble cycliste - vélo, ce qui équivaut à un gain de 1 min 48 sur un contre-la-montre de 55 km (tableau 4). Pour ce faire, ils expliquent notamment avoir utilisé cinq textiles aux propriétés de rugosité différentes en fonction des endroits de la combinaison, avoir optimisé le patronage pour que la combinaison moule parfaitement le corps du cycliste et avoir positionné les coutures dans le sens de l'écoulement ou aux endroits de faibles pressions et vitesses d'écoulement.

Tableau 4 Traînée aérodynamiques à 53 km/h d'un ensemble cycliste - vélo avec les différentes combinaisons Nike développées au cours de leurs recherches dans différentes conditions (statiques et lors du pédalage) (Brownlie *et al.*, 2009). La combinaison de l'année 2003 est considérée comme la référence dans leur étude comparative.

Suit	Aero drag (g)	Drag difference (g) [†]	Drag increase (%)	Time difference in 55 Kms ⁻¹
2001 TT suit, static	3397	+212	+6.7	+75
2001 TT suit, pedaling	3258	+81	+2.5	+28
2002 track suit, pedaling	3333	+156	+4.9	+55
2002 TT suit, static	3229	+44	+1.4	+16
2003 TT suit, static	3185	0 (Ref)	+0 (Ref)	0 (Ref)
2003 TT suit, pedaling	3177	0 (Ref)	+0 (Ref)	0 (Ref)
2004 TT suit, pedaling	3131	-46	-1.4	-16
2005 TT suit, pedaling	3133	-44	-1.4	-16
2004 track suit, pedaling	3124	-53	-1.7	-21
2004 prototype tracksuit and leggings, pedaling	3100	-85	-2.7	-33

[†]All differences are statistically significant ($P < 0.05$).

Dans le même sens, Underwood *et al.* (2011) ont également montré que le placement des coutures et des textiles aux rugosités différentes permettait d'améliorer les combinaisons cyclistes. Ils expliquent que sur les segments parallèles à l'écoulement de l'air (torse et avant-bras), le bon ajustement de la combinaison et le placement des coutures dans le sens de l'écoulement, permettant d'éviter les plis, est tout aussi important que le textile couvrant ces surfaces. Sur les segments où l'écoulement de l'air est transversal (bras et épaules), la rugosité du textile ainsi que la position des coutures peuvent avoir une influence sur l'écoulement de la couche limite, notamment en déclenchant la transition entre l'écoulement laminaire et turbulent.

En dehors de la combinaison, les chaussures et couvre-chaussures sont également des équipements pouvant intervenir dans l'amélioration de l'aérodynamisme du cycliste. Il convient de relever que la complexité d'évaluation de la traînée des chaussures et couvre-chaussures provient du fait que la vitesse d'écoulement relative au pied résulte de la vitesse d'avancement du système cycliste - vélo mais également de la vitesse de pédalage. Gibertini *et al.* (2010) ont étudié les différences de traînée entre deux modèles de chaussures (un modèle à lacets et un autre avec scratch et cliquets de serrage), ainsi que l'influence de couvre-chaussures. Ils ont montré une différence de 8% sur la traînée aérodynamique du pied entre les deux modèles en faveur des chaussures à lacets, ainsi qu'une augmentation de 1% avec le port de couvre-chaussures. Cependant leur protocole de mesure présentait de nombreuses limites étant donné que le pied (pièce en plastique) était isolé et statique dans la soufflerie. D'autre part, une étude en soufflerie de Grappe plus écologique avec des cyclistes en condition de pédalage a reporté une diminution de 1,7 % de la traînée de l'air de l'ensemble cycliste - vélo avec le port de couvre-chaussures (Grappe, 2009).

Enfin comme on l'a vu précédemment, la tête a une part importante dans la traînée totale du cycliste en position de CLM (19 %) (Defraeye *et al.*, 2011a). Depuis 2003, le port d'un casque comportant une coque rigide est obligatoire en compétition pour les courses en ligne et les CLM. Les nombreuses différences de formes et de conception des casques entraînent des différences significatives de traînée aérodynamique. Il est donc nécessaire d'optimiser le casque pour les épreuves CLM, tout en trouvant le bon compromis avec la thermorégulation (Alam *et al.*, 2008). Des études récentes en soufflerie ont comparé la traînée aérodynamique de casques de CLM en considérant les effets de la taille et de la forme du casque, de la présence de visière, de l'inclinaison de la tête et de l'angle du vent (Blair et Sidelko, 2008 ; Chabroux V. *et al.*, 2008 ; Brownlie *et al.*, 2010 ; Chabroux V. *et al.*, 2011).

Blair et Sidelko (2008) ont montré que les casques aérodynamiques de CLM étaient plus aérodynamiques qu'un casque standard de course en ligne avec des aérations, ainsi que la hiérarchie entre les casques variait selon l'angle du vent et l'inclinaison de la tête.

Dans le même sens, Chabroux *et al.* (2008) ont montré que la traînée de l'air sur 6 casques de CLM augmentait jusqu'à 3,4% plus l'inclinaison de la tête vers le bas était importante. Ils ont également observé une diminution moyenne de la traînée totale de l'ensemble cycliste – vélo de 1,5 % avec le port d'une visière. Dans une autre étude Chabroux *et al.* (2010) ont étudié l'écoulement du sillage de différents casques de CLM en fonction de leur longueur, largeur et surface (figure 43). Ils en concluent que 1) la largeur des casques doit être minimisée, 2) le bord de fuite ne doit pas être arrondi afin d'affiner l'épaisseur du sillage, 3) les creux et aspérités ne sont pas recommandés afin de limiter les décrochages et turbulences dans la couche limite et 4) la forme de goutte d'eau semble être la forme optimale pour réduire la traînée. Enfin, ils soulignent que la traînée induite par le casque sur le reste du corps, notamment au niveau du dos, est à prendre en considération afin de mesurer son impact de manière globale sur la traînée.







	Casque				
	1	2	3	4	5
					
				Avec visière	aérations
F_x (N)	38.1±0.5	37.6±0.5	38.1±0.6	37.5±0.6	38.0±0.6
	F(4, 32) = 5.123, p<0.05				
					
C_x	0.93±0.02	0.93±0.02	0.93±0.02	0.92±0.02	0.93±0.02
	F(4, 32) = 4.386, p<0.05				
S_f (m ²)	0.343±0.007	0.341±0.007	0.344±0.007	0.341±0.007	0.342±0.007
	F(4, 32) = 4.262, p<0.05				

Figure 43 Comparaison des performances aérodynamiques de cinq casques de CLM dans une étude de Chabroux (2010)

Les nouvelles méthodes CFD devraient permettre d'améliorer le développement des casques de CLM, notamment en individualisant leur géométrie en fonction de l'anatomie corporelle des cyclistes (Defraeye *et al.*, 2011a).

4.2 Matériel

Les roues représentent une grande proportion dans le 1/3 de la traînée aérodynamique du système homme – machine attribué au vélo. En effet, elles ont une influence importante dans l'écoulement de l'air autour du vélo (Lukes *et al.*, 2005). C'est la raison pour laquelle on retrouve un grand nombre de recherches en soufflerie effectuées sur ce composant depuis les années 1980 avec de multiples comparaisons entre les roues paraculaires, lenticulaires, à bâtons et en fonction du nombre de rayons (Kyle et Burke, 1984 ; Zdravkovich, 1992 ; Capelli *et al.*, 1993 ; Greenwell *et al.*, 1995 ; Tew et Sayers, 1999). Les roues paraculaires et lenticulaires sont des roues pleines où les disques sont plats et parallèles pour la roue paraculaire alors qu'ils sont bombés et asymétriques pour la lenticulaire. Le résultat principal de ces études montre que les roues à disques sont significativement plus performantes sur le plan aérodynamique que les autres roues. De plus, ces études mettent en lumière une grande disparité sur la traînée des roues en fonction de la hauteur des jantes, du nombre et de la forme des rayons. Par exemple, Greenwell *et al.* (1995) ont montré que la traînée d'une roue pleine était inférieure de 26% comparée à celle d'une roue standard à rayons. Cependant, une grande partie des résultats ne sont pas valides puisque les roues sont souvent testées isolément, ce qui n'est pas véritablement représentatif des conditions réelles où la traînée des roues interagit

avec celle du cadre et du cycliste. L'étude de Barry *et al.* (2012) semble plus écologique étant donné que les différentes roues ont été testées en soufflerie, montées sur un vélo avec un mannequin représentant un cycliste, à différentes vitesses et différents angles de vent (figure 44). Les résultats ont montré que jusqu'à un angle apparent de 20° la roue pleine était la plus performante d'un point de vue aérodynamique alors qu'entre 20 et 30° c'était une roue à 3 bâtons. D'autre part, les forces latérales générées par un vent soufflant de côté étaient supérieures avec une roue pleine et les différences augmentaient plus l'angle du vent apparent était important. Ces forces latérales, souvent négligées dans les différentes études quantifiant la traînée des roues, rendent le vélo difficile à piloter (manœuvrer et diriger). C'est la raison pour laquelle il est rare de trouver des vélos de CLM équipés d'une roue pleine à l'avant. Cette composante additionnelle doit également être prise en considération dans le choix des roues selon les conditions atmosphériques puisqu'elles peuvent nuire au pilotage et à la performance (Tew et Sayers, 1999 ; Barry *et al.*, 2012).



Figure 44 Méthode expérimentale avec le mannequin et détails des roues testées dans l'étude de Barry *et al.* (2012)

Karabelas and Markatos (2012) ont étudié l'influence du nombre de rayons sur la traînée aérodynamique en conduisant une étude expérimentale en soufflerie et une autre étude en CFD. Les résultats ont montré une augmentation de la traînée de l'air avec le nombre de rayons.

Les études récentes de Hanna (2002) mais surtout de Godo *et al.* (2009, 2010, 2011) valident l'utilisation de la CFD afin de mieux comprendre l'écoulement du flux d'air autour des roues en mouvement et leur interaction avec les différents composants qui les entourent : fourche, cadre et étriers de frein (figure 45). C'est avec cette méthode que Hanna (2002) a montré qu'une roue pleine à l'arrière améliorerait la traînée de l'ensemble cycliste – vélo de 2% avec

un vent d'angle de 0° et qu'elle agissait comme une voile avec des vents de côté puisqu'une roue pleine permettait de réduire la traînée de la roue arrière de 17% par rapport à une roue standard. Cependant, Hanna a également mis en évidence que l'effet positif de la roue pleine sur le plan aérodynamique avec des vents de côté était associé à une augmentation des forces latérales exercées sur le vélo et le cycliste. Cette étude confirme le fait que les roues pleines sont plus performantes d'un point de vue aérodynamique mais que selon les conditions de vent, elles peuvent nuire à la performance en rendant le pilotage difficile.

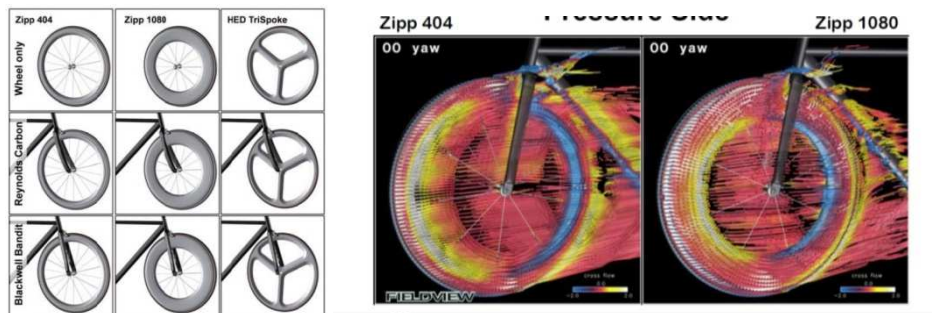


Figure 45 Géométries du cadre, de la fourche et des roues utilisées dans l'étude de Godo et al. (2011) ainsi qu'une visualisation des différences d'écoulement entre deux roues différentes avec un vent d'angle de 0°

Les recherches actuelles sur le développement des cadres par les constructeurs utilisant la méthode CFD ne font l'œuvre d'aucune publication scientifique. La concurrence dans l'industrie du cycle étant rude, on comprend aisément que les sociétés ne souhaitent pas communiquer sur leurs travaux R&D. Cependant, la démarche méthodologique de développement du nouveau cadre de CLM Cervelo a été publiée par la société qui a réalisé l'étude CFD (Sidorovich, 2012). Dans un premier temps, les ingénieurs ont fabriqué un mannequin à la taille réelle d'un cycliste pour améliorer la précision et la répétabilité des mesures en soufflerie. Dans un second temps, ils ont validé leur méthode de calcul CFD en fonction des expérimentations réalisées en soufflerie avec leur ancien vélo et le mannequin (figure 46). Pour finir, ils ont développé numériquement par calculs le meilleur cadre au niveau aérodynamique qu'ils ont ensuite validé de manière expérimentale dans la soufflerie. Ils se sont concentrés à optimiser trois parties du cadre : l'interface potence - cintre – prolongateurs, l'interface fourche – étrier de frein avant – tube de direction et le tube de selle.

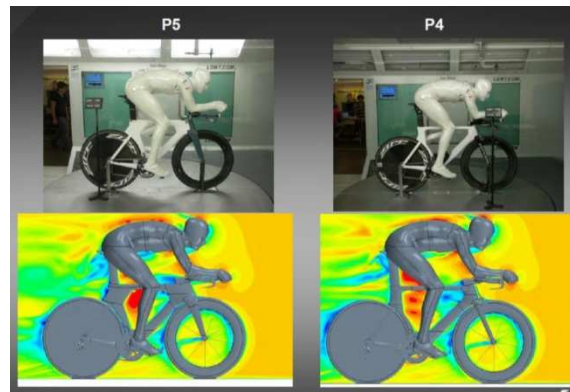


Figure 46 Comparaison de l'ancien cadre Cervelo P4 et du nouveau cadre P5 en soufflerie et en CFD

Une fois leur cadre prototype achevé, ils ont effectué une comparaison entre la traînée aérodynamique totale du système cycliste – vélo avec le nouveau cadre et celles avec sept autres cadres de marques concurrentes (figure 47). Le nouveau cadre Cervélo P5 présentait une traînée inférieure de 3% par rapport à l'ancien cadre P4 et possédait la traînée la plus faible comparé aux autres cadres concurrents (bien qu'ils ne mentionnent pas les différences relatives avec les cadres des autres marques).

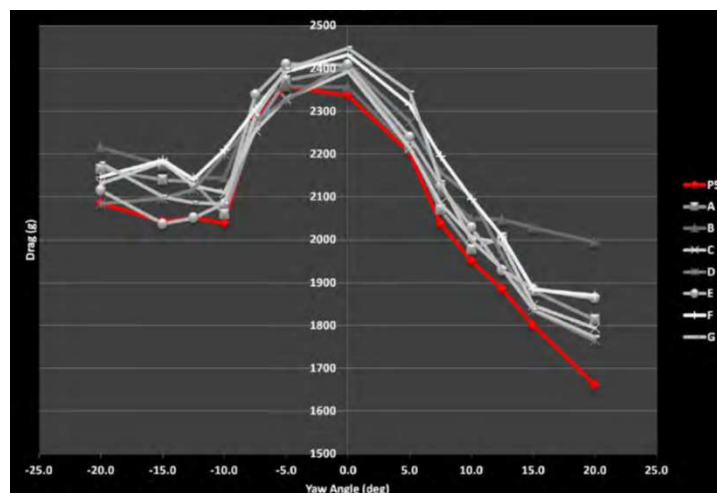


Figure 47 Traînées aérodynamiques de l'ensemble mannequin + vélo en fonction de l'angle du vent entre le cadre Cervelo P5 (rouge) et sept cadres de marques concurrentes

Les travaux récents montrent que la méthode CFD, lorsqu'elle est bien maîtrisée, est capable de reproduire numériquement les phénomènes physiques aérodynamiques autour du système cycliste - vélo (Lukes *et al.*, 2005 ; Godo *et al.*, 2011 ; Hanna R. K., 2012). L'utilisation de cette méthode devrait ainsi permettre l'amélioration des connaissances et des possibilités d'optimisation des composants matériels du vélo. Il apparaît que la démarche méthodologique combinant les calculs en CFD et la mesure expérimentale en soufflerie devienne la tendance actuelle des sociétés du cycle dans leurs projets R&D de conception des vélos.

5. Synthèse et objectifs de travail

Les différentes méthodes d'évaluation de la traînée aérodynamique présentent chacune des avantages et des limites qu'il convient de bien prendre en considération lorsqu'on souhaite les utiliser. La méthode CFD, avec une validation particulièrement récente dans le domaine du cyclisme, devrait permettre à terme d'améliorer les connaissances sur les écoulements de l'air autour du système cycliste - vélo et ainsi, de mieux orienter le développement du matériel. Elle autorise ainsi un meilleur développement du matériel.

Le chapitre qui suit présente la démarche méthodologique que nous avons utilisé pour réaliser les mesures aérodynamiques à partir de différentes techniques complémentaires.

Comme expliqué précédemment, la complexité de ce travail a été de collaborer avec les différents partenaires techniques. Nous étions donc dépendants de leur volonté de collaborer sur les projets de développement et celle de partager les informations confidentielles. Un choix a été établi sur les composants à optimiser en fonction 1) de leur impact sur la performance en terme aérodynamique, et 2) de la possibilité d'intervenir en collaboration avec les sociétés partenaires au sein du projet R&D.

Ainsi nos travaux ont porté sur l'étude R&D :

- du cadre de CLM Lapierre (étude 1, chapitre 2), ainsi que sur son interface avec le kit bidon – porte bidon Elite ;
- du casque aérodynamique de CLM Uvex (étude 2, chapitre 3) ;
- du casque aérodynamique de course en ligne Uvex puis Alpina (étude 3, chapitre 4) ;
- de la combinaison de CLM Moa puis BTwin (étude 4, chapitre 5) ;

Nos interventions dans ces différents projets R&D ont été différentes en fonction de la place et du rôle confié par le partenaire. Ainsi, nous sommes intervenus à différentes étapes du projet de R&D selon le composant :

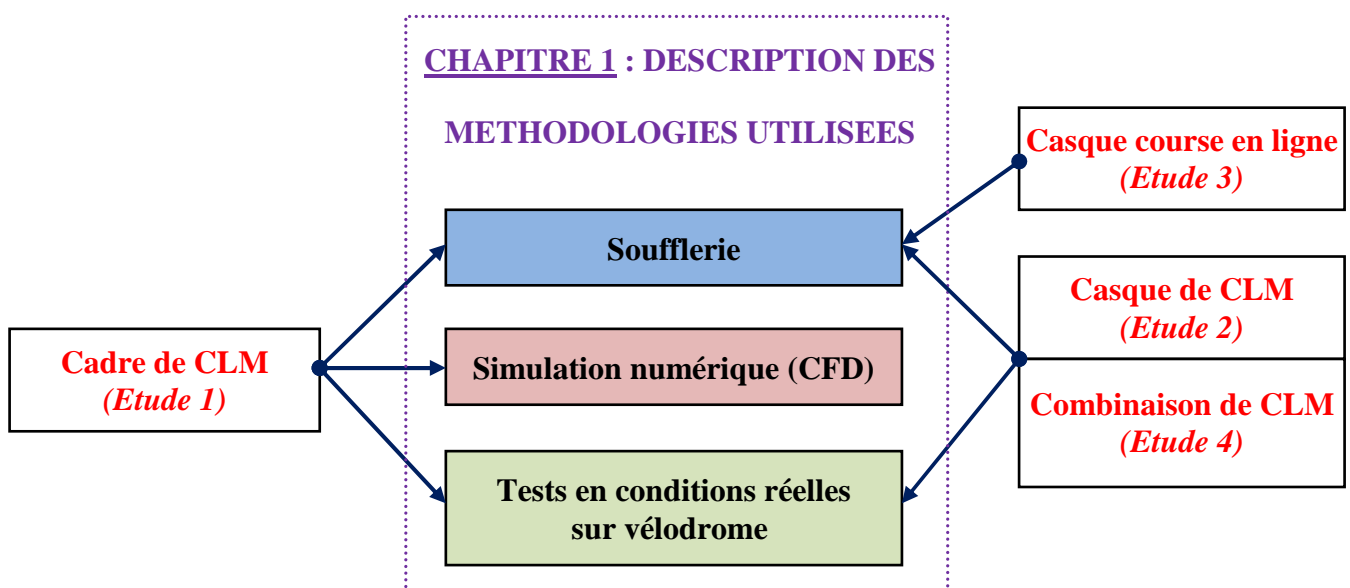
- cadre de CLM : participation au cahier des charges, recherche et validation ;
- casque de CLM : participation au cahier des charges et validation ;
- casque aérodynamique de course en ligne : participation au cahier des charges et validation ;
- combinaison de CLM : participation au cahier des charges, recherche et validation.

Ce travail n'a fait l'œuvre d'aucune publication scientifique étant donné le caractère confidentiel des recherches qui ont été conduites à la fois pour les sociétés partenaires au niveau commercial mais également dans un contexte de concurrence sportive dans lequel notre équipe FDJ se situe. Ainsi, chaque expérimentation faisait l'œuvre d'un rapport interne à destination du département R&D de l'équipe FDJ et du partenaire associé.

Le chapitre qui suit détaille les différentes méthodologies employées pour conduire les études.

CHAPITRE 1 : Méthodologies utilisées

Trois méthodes expérimentales ont été utilisées au cours de ce travail d'optimisation de la traînée aérodynamique à travers l'amélioration du matériel et des équipements : la soufflerie, les tests sur vélodrome et la CFD. Les protocoles de recherche utilisés dans les quatre projets R&D sont successivement décrits dans ce chapitre. Le schéma ci-dessous présente les méthodologies associées à chaque étude :



1. Soufflerie

1.1. Généralités

Tous les essais en soufflerie ont été réalisés dans la soufflerie Aero Concept Engineering (ACE) située dans le pôle performance du circuit de Nevers – Magny-Cours. C'est une soufflerie de type circuit fermé à retours (figure 48).

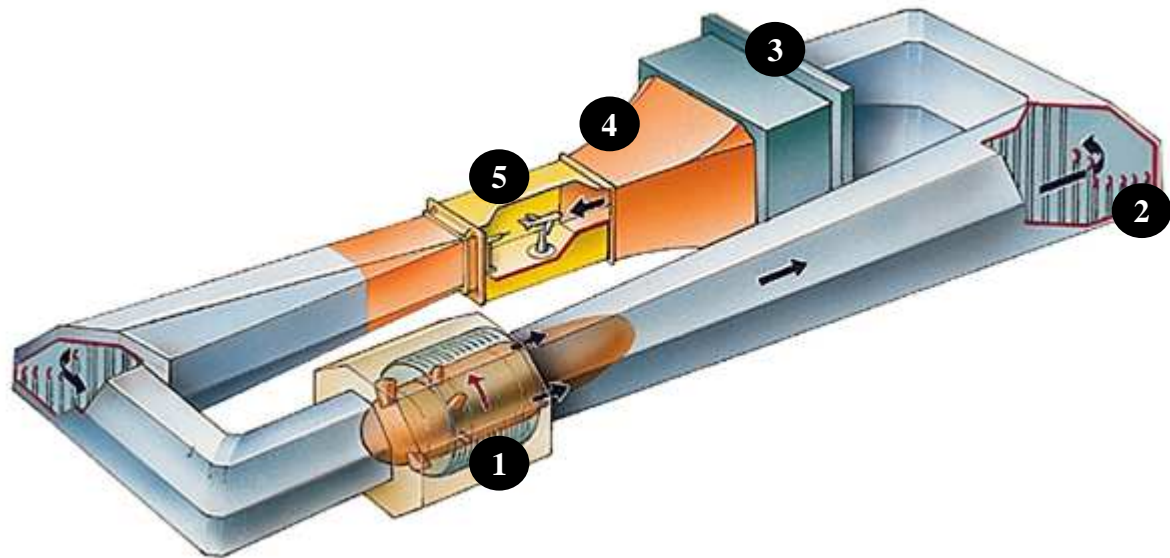


Figure 48 Plan d'une soufflerie en circuit fermé à retours (Source : www.larousse.fr) et vues extérieures de la soufflerie ACE : ventilateur (1), aubes de virage (2), chambre de tranquillisation (3), convergent (4), veine d'essais (5)

Le circuit comprend quatre coudes à angle droit. A l'opposé de la veine d'essai où sont réalisées les mesures, un ventilateur doté de grandes pales et d'un variateur commandant la vitesse du vent souhaitée (entre 0 et 150 km/h), met le volume d'air en mouvement (numéro 1, figure 48). La conduite des écoulements d'air est divergente afin de limiter les pertes de charges dans les obstacles qu'ils affrontent : les aubes de virage et la chambre de tranquillisation. Les aubes présentent dans les virages canalisent et orientent l'écoulement, notamment afin de réduire son aspect rotationnel en sortie de ventilateur (numéro 2, figure 48). Suite aux deux virages, la chambre de tranquillisation (numéro 3, figure 48) permet de supprimer définitivement l'aspect rotationnel de l'écoulement et de le rendre colinéaire avec l'axe de la veine d'essai. Un convergent (conception géométrique) placé à la sortie de la chambre permet d'accélérer l'écoulement pour obtenir une vitesse homogène et unidirectionnelle de l'écoulement autour du produit testé (numéro 4, figure 48). La veine

d'essai comporte la balance de force mesurant la perte énergétique de l'objet testé face à l'écoulement (numéro 5, figure 48). La section d'essais a une longueur de 4,75 m, une largeur de 2,3 m et une hauteur de 2,2 m. L'écoulement redevient divergent après la veine d'essai. Lors d'une mesure, l'écoulement est stabilisé et le ventilateur intervient uniquement pour combattre les pertes de charges dues aux différentes singularités (aubes, chambre de tranquillisation et l'objet testé).

La veine d'essais de la soufflerie ACE peut s'organiser sous différentes configurations selon la nature des éléments à tester (voiture, moto, vélo, ski, luge...). Elle possède une configuration spécifique pour l'évaluation de la traînée aérodynamique du système cycliste - vélo permettant d'éviter certains biais méthodologique présentés précédemment (figure 49) :

- Mesure de l'effort de traînée à partir d'une balance de force type plateau équipée de jauges de contraintes de précision à 0,1% (mesure de la déformation) (25kg) ;
- Aspiration de la couche limite au niveau du sol permettant d'éviter la traînée provoquée par l'écoulement le long du sol de la soufflerie ;
- Rotation du plateau permettant de simuler des angles de vent apparent de 0 à 20° ;
- Commande de la vitesse de rotation des roues sans pédalage ;
- Réglage d'une résistance permettant la simulation du pédalage en conditions réelles ;
- Chauffage de l'air de la soufflerie par temps froid (quelques degrés).

Les différentes commandes informatiques de la vitesse du vent, de la vitesse de rotation des roues, de la résistance appliquée aux roues et de l'angle de rotation du plateau s'effectuent par des logiciels développés en interne par ACE. De même, le logiciel permettant l'estimation de la traînée de l'air sur le système cycliste - vélo a été développé en interne. L'information transmise pour chaque mesure est le SC_x .

Ces différentes possibilités de réglages offrent une grande variété dans le choix des protocoles de mesure puisqu'elles donnent accès à la majeure partie des paramètres permettant de reproduire les conditions réelles rencontrées sur le terrain : vitesse et angle du vent apparent, vitesse des roues égale à la vitesse d'avancement et pédalage du cycliste contre une résistance.

L'objectif des essais en soufflerie était de diminuer la traînée aérodynamique totale du système cycliste - vélo en optimisant certains composants. En fonction du composant testé, le but était de définir un protocole d'essai spécifique permettant d'évaluer de manière précise son impact sur la traînée totale.



Figure 49 Veine d'essais en configuration « vélo » avec l'ensemble cycliste - vélo installé sur le plateau de mesure

1.2. Elaboration d'un mannequin

De manière à mieux standardiser les mesures et pour améliorer à la fois la précision, la reproductibilité et la répétabilité des mesures, un mannequin à la taille réelle d'un athlète de l'équipe a été réalisé. Le choix du cycliste s'est établi de manière stratégique étant donné que ce coureur est un leader d'avenir de l'équipe pour les courses à étapes, où la discipline du CLM est importante. Comparé à un sujet humain, les avantages de réaliser des essais en soufflerie avec un mannequin sont 1) la stabilité des mesures dans le temps, 2) la mobilisation à volonté car non soumis à la logistique et aux calendriers inhérent au métier de coureur cycliste, 3) immobile durant la mesure et 4) réglable, ce qui permet d'adopter une position parfaitement identique entre les essais. Avec cette méthode expérimentale, il devient possible de tester des composants matériels en augmentant la sensibilité de la mesure.

Etapes de la construction du mannequin :

Etape 1 : Scanning du cycliste en position de CLM à l'aide d'un bras poly-articulé avec camera laser 3D de marque Romer ayant une acquisition de 600 points par seconde (mannequin : 20 millions de points) (figure 50).

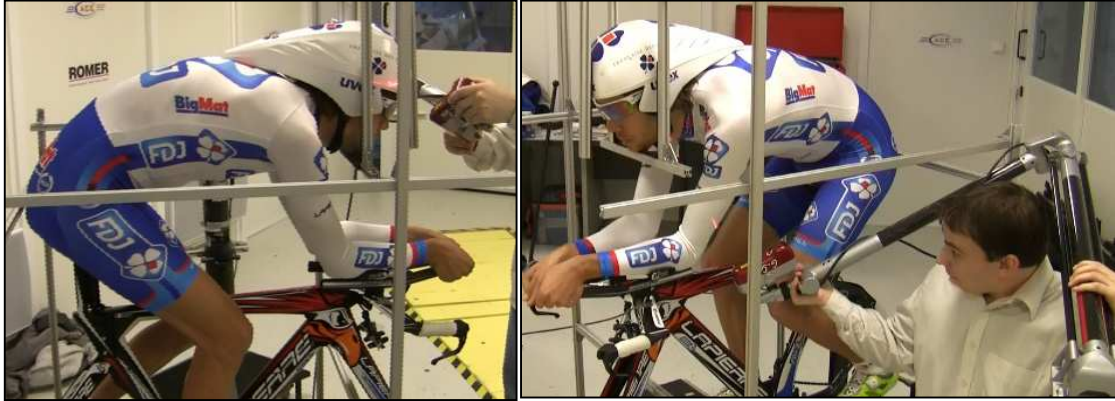


Figure 50 Etape 1 : scanning du cycliste

Etape 2 : Reconstruction du maillage avec repositionnement automatique moyenné de surface à l'aide du logiciel Polyworks (figures 51 et 52).



Figure 51 Etape 2 : construction du fichier CAO

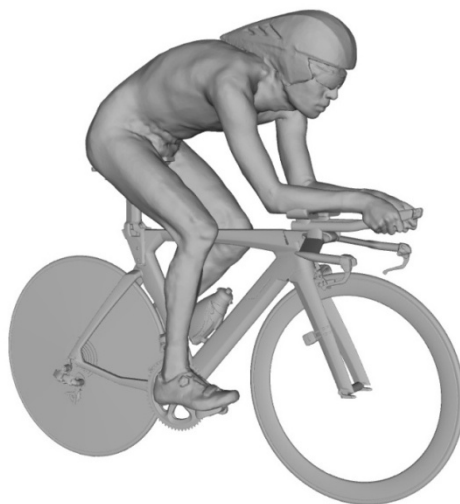


Figure 52 Image du maillage finalisée du coureur sur le vélo de CLM

Etape 3 : Le fichier CAO 3D (Conception Assistée par Ordinateur) a permis de réaliser l'enveloppe extérieure du mannequin. Chaque segment du corps a été usiné dans une matière polystyrène (figure 53).



Figure 53 Etape 3 : usinage des différents segments (pied et avant-bras sur ces photos)

Etape 4 : Les différents segments du corps sont assemblés et fixés sur un squelette mécanique (figure 54).



Figure 54 Etape 4 : reconstitution des membres inférieurs et de la tête

Etape 5 : Un composite est appliqué sur la surface afin de rigidifier l'ensemble, puis peint. Des articulations sont installées au niveau du cou, des épaules, des mains et du bassin afin de

pouvoir effectuer quelques changements de positions et adapter le mannequin sur un vélo de course en ligne. Le mannequin est ensuite installé sur un vélo de CLM (figure 55).



Figure 55 Premier montage du mannequin sur le vélo de CLM

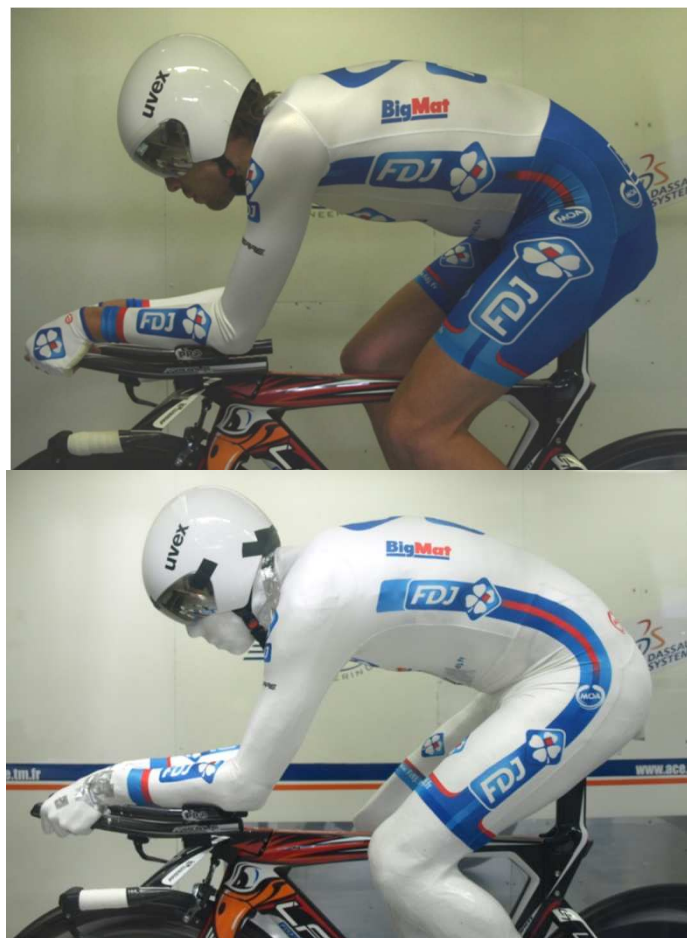


Figure 56 Cycliste et son mannequin en position de CLM

Cependant, il convient de souligner que l'utilisation d'un tel mannequin possède certaines limites. Ainsi, le fait que le mannequin ait les membres inférieurs immobiles est un biais méthodologique puisque la traînée induite par le pédalage peut avoir des répercussions sur la traînée des composants environnants. D'autre part, le casque ayant une traînée induite directement sur le corps de l'athlète, les résultats de SC_x obtenus sur des essais de casques ne sont valables que pour le cycliste testé en raison des différences de morphologie entre les athlètes. La prise en compte de cette limite justifie d'autant plus le choix d'avoir réalisé le mannequin d'un coureur dont les performances en CLM seront importantes dans les années à venir.

Malgré tout, la construction de ce mannequin aura permis d'améliorer significativement la précision des mesures (± 1 W soit moins de $\pm 0,5\%$) ainsi que d'avoir une démarche méthodologique plus aboutie. En effet, l'expérimentation de plusieurs techniques de visualisation des écoulements du flux d'air (visualisation pariétale et par fil de laine) a été possible afin de mieux comprendre les écoulements autour du système cycliste - vélo.

1.3. Visualisation des écoulements pariétaux

La visualisation pariétale est une technique expérimentale réalisable en soufflerie. Son objectif est de mettre en évidence visuellement les écoulements d'air en surface. Le principe consiste à répartir à l'aide d'une bombe une peinture liquide spécifique (mélange entre un marqueur colorant extrêmement fin, micrométrique, et une solution liquide) sur l'objet étudié (mannequin, casque, vélo...) puis de mettre en route l'hélice de la soufflerie afin de créer un vent d'une certaine vitesse. Avec le flux d'air, le liquide s'évapore très rapidement pour permettre au marqueur de prendre un positionnement géométrique défini par l'écoulement de la couche limite sur la surface. Ainsi, les zones d'accélération, de frottements et tourbillonnaires sont visibles en fonction de l'intensité des couleurs et des dessins induits par l'effet du vent sur la peinture (figure 57). Les parties claires, où la peinture sèche rapidement, correspondent aux parties où l'écoulement est laminaire alors que les parties foncées où la peinture ne sèche pas par endroit correspondent aux endroits où l'écoulement est turbulent. Entre ces deux parties, de fines zones d'accumulation de peinture apparaissent et représentent les lignes de décollement c'est-à-dire l'endroit où a lieu la transition laminaire / turbulent dans l'écoulement de la couche limite. Cette technique ne peut être réalisée qu'avec l'utilisation d'un mannequin. Elle permet d'améliorer la compréhension des phénomènes aérodynamiques

par visualisation des effets de l'air sur le système cycliste - vélo, notamment des effets de sa viscosité.



Figure 57 Visualisation des écoulements pariétaux

1.4. Visualisation dans le volume d'écoulement avec fil de laine

Une autre technique de visualisation des écoulements de surface existe. Elle consiste à répartir sur la surface du corps que l'on souhaite étudier des petits fils de laine (figure 58) qui seront mis en mouvement avec l'écoulement du flux d'air. Suivant l'orientation des fils, il est donc possible de déterminer si l'écoulement en surface est laminaire, turbulent ou transitoire.



Figure 58 Visualisation des écoulements pariétaux avec des fils de laine sur un casque

La visualisation de l'écoulement avec un fil de laine permet d'observer les flux laminaires et turbulents en fonction de la courbure qu'adopte le fil. Le principe est simple, il suffit de placer à l'aide d'une canne (trou à travers la vitre) un fil de laine très léger et assez court aux endroits où l'on souhaite étudier la viscosité de l'air (figure 59). Le fil de laine indique la direction du vecteur vitesse de l'écoulement de l'air (figure 60). Il peut également prendre la direction contraire au vent, ce qui indique un flux contraire ou une zone de basse vitesse. De la même manière que la visualisation pariétale, cette technique renseigne avec un procédé plus simple la nature de l'écoulement de la couche limite.

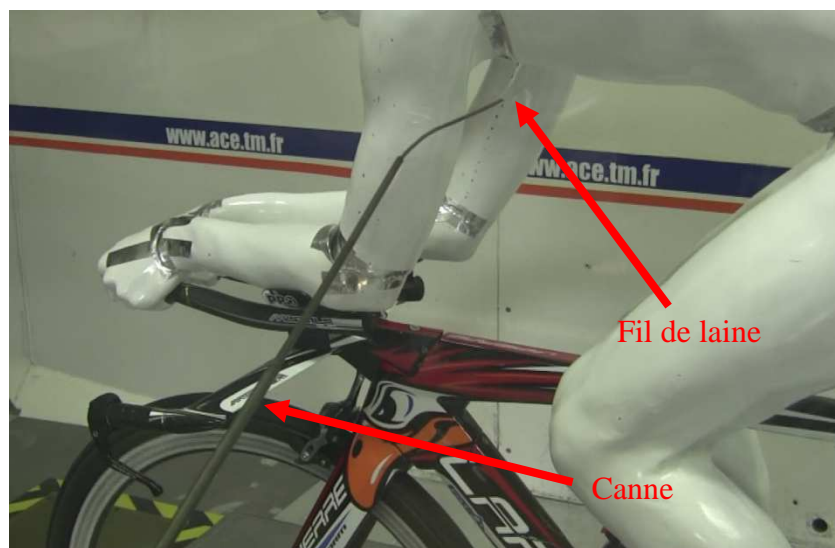


Figure 59 Dispositif de visualisation de l'écoulement avec une canne dotée d'un fil de laine à son extrémité

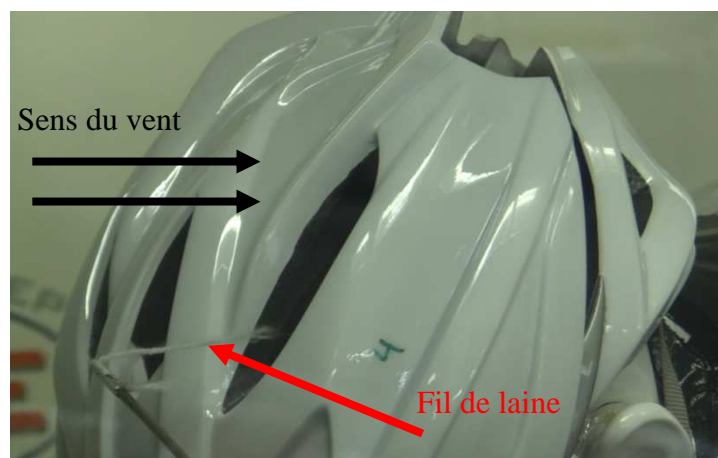


Figure 60 Visualisation de l'écoulement avec un fil de laine au niveau d'un casque

1.5. Mesure du SC_x

Lors de chaque essai, le SC_x est calculé par le logiciel développé par ACE à partir de la mesure de force appliquée sur la balance de force placée dans la soufflerie. Le SC_x est obtenu à partir de l'équation :

$$SC_x = \frac{R_s}{0,5 \cdot \rho \cdot V_s^2} \quad (30)$$

Où R_s équivaut à l'effort de traînée du système cycliste - vélo mesurée par la balance, ρ la masse volumique de l'air à l'intérieur de la soufflerie, V_s la vitesse du vent de la soufflerie correspondant au vent apparent.

Les différents essais de matériel ou d'équipements ont pour objectif de mettre en évidence des différences de SC_x selon qu'ils améliorent ou dégradent la pénétration dans l'air.

1.6. Protocole expérimental

Chaque essai en soufflerie se caractérise par :

- un angle de vent,
- une vitesse de vent,
- une vitesse de rotation des roues.

L'angle et la vitesse du vent en soufflerie sont équivalents à l'angle et à la vitesse du vent apparent en conditions réelles. Sur le terrain, ce vent apparent se caractérise par trois variables :

- La vitesse de déplacement,
- L'angle du vent atmosphérique (figure 61),
- La vitesse du vent atmosphérique.

La vitesse de rotation des roues en soufflerie est équivalente à la vitesse de déplacement du cycliste sur le terrain.

Il convient de caractériser une condition rencontrée sur le terrain pour calculer la vitesse et l'angle du vent apparent, définissant la condition d'essai en soufflerie.

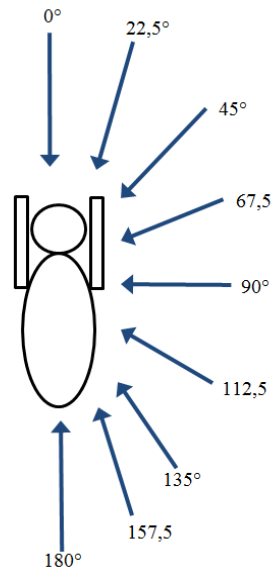


Figure 61 Exemples d'angle de vent atmosphérique s'appliquant sur le cycliste

Ainsi, la vitesse et l'angle du vent apparent s'obtiennent à partir des équations (figure 62) :

$$V_a = \sqrt{V_d^2 + V_v^2 + 2 \cdot V_d \cdot V_v \cdot \cos \alpha} \quad (31)$$

$$\alpha = \arctan \left(\frac{V_d \cdot \sin \beta}{V_v + V_d \cdot \cos \alpha} \right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (32)$$

Où V_d correspond à la vitesse de déplacement, V_v au vent météo et α l'angle du vent météo par rapport à l'axe de l'avancement.

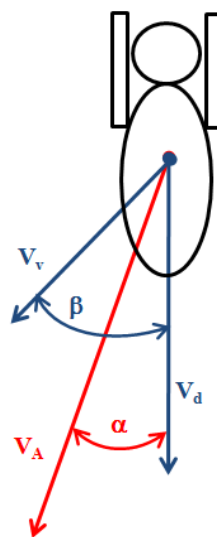


Figure 62 Schématisation des différents vecteurs de vent s'appliquant sur le cycliste lors de son avancement

Exemples :

Cas n°1 : Un cycliste roule à 40 km/h avec un vent de face de 10 km/h :

- Vitesse du vent atmosphérique : 10 km/h
- Angle du vent atmosphérique : 0°
- Vitesse de déplacement : 40 km/h

En soufflerie, on reproduit cette situation avec :

- Angle de vent (= angle de vent apparent) : 0°
- Vitesse du vent (= angle de vent apparent) : 50 km/h
- Vitesse des roues (= vitesse de déplacement) : 40 km/h

Cas n°2 : Un cycliste roule à 40 km/h avec un vent de 10 km/h d'angle 25°

- Vitesse du vent atmosphérique : 10 km/h
- Angle du vent atmosphérique : 25°
- Vitesse de déplacement : 40 km/h

En soufflerie, on reproduit cette situation avec :

- Angle de vent : 20°
- Vitesse du vent : 50 km/h
- Vitesse des roues : 40 km/h

Le choix du protocole d'essai en soufflerie a été déterminé en prenant en considération :

- le type de matériel ou d'équipement testé,
- le fait qu'il soit réalisé avec un coureur ou le mannequin,
- le fait que le cycliste pédale ou reste immobile,
- les possibilités de réglages de la vitesse et des angles de la soufflerie : vitesse maximum 60 km/h et angle maximum 20°,
- le fait que le SC_x soit dépendant de la vitesse,
- le coût d'une journée d'essais en soufflerie et le temps imparti pour la passation de chaque test,
- la difficulté de pouvoir reproduire l'ensemble des conditions de vent pouvant être retrouvé sur le terrain,

Par conséquent, le protocole initial utilisé lors des premières sessions de tests a été déterminé avant d'être modifié suite à des conclusions tirées des premiers essais. Voici le détail des deux protocoles utilisés :

Protocole 1 :

- Mesure n°1 : angle 0° - 40 km/h
- Mesure n°2 : angle 0° - 50 km/h
- Mesure n°3 : angle 0° - 60 km/h
- Mesure n°4 : angle 10° - 40 km/h
- Mesure n°5 : angle 10° - 50 km/h
- Mesure n°6 : angle 10° - 60 km/h

Protocole 2 :

- Mesure n°1 : angle 0° - 40 km/h
- Mesure n°2 : angle 0° - 50 km/h
- Mesure n°3 : angle 0° - 60 km/h
- Mesure n°4 : angle 5° - 50 km/h
- Mesure n°5 : angle 10° - 50 km/h
- Mesure n°6 : angle 15° - 50 km/h
- Mesure n°7 : angle 20° - 50 km/h

Remarque : des essais préliminaires ont montré que l'impact de la différence entre la vitesse des roues et la vitesse du vent apparent, correspondant au vent de la soufflerie, était négligeable (moins de 0,5 %). Par commodité, la vitesse des roues a donc été fixée à la même vitesse que la vitesse du vent de la soufflerie.

Le protocole n°2, où l'angle du vent apparent varie pour une même vitesse, permet de mettre plus facilement en évidence l'existence de phénomènes de variations de l'écoulement dans la couche limite avec des vents de côté. Pour ces mêmes raisons, différentes vitesses de vent avec un angle de 0° ont été testées, contrairement à de nombreuses études qui se basent uniquement sur une seule vitesse.

La mesure du SC_x était effectuée sur 30 sec avec un cycliste et sur 20 sec avec le mannequin.

1.7. Analyse des résultats

Pour une meilleure compréhension et une meilleure interprétation des résultats, les $P_{méca}$ équivalentes aux valeurs de SC_x ont été calculées pour chaque essai dans les différentes conditions de vent (vitesse et angle) en considérant l'ensemble cycliste - vélo roulant à une vitesse constante. Pour cela, les différentes variables ont été standardisées en fixant la masse totale (homme + vélo + équipements) et le coefficient de roulement de manière à pouvoir comparer les résultats entre chaque session. Les $P_{méca}$ estimées étaient obtenues avec l'équation (Millet *et al.*, 2013) :

$$P_{méca} = [(0.5 \cdot \rho \cdot SC_x \cdot V_a^2) + (C_r \cdot m_t \cdot g)] \cdot V_d + P_f \quad (33)$$

Où V_a correspond au vent apparent (= vent de la soufflerie), C_r au coefficient de résistance au roulement (fixé à 0,0025), m_t à la masse totale homme + vélo + équipements (fixé à 79 kg), V_d à la vitesse des roues (= vitesse de déplacement) et P_f à la $P_{méca}$ produite pour vaincre les frictions mécaniques, fixée constante (Millet *et al.*, 2013).

L'ensemble des résultats obtenus en soufflerie était présenté à partir de $P_{méca}$ estimée, ce qui permettait de mieux appréhender l'influence des écarts de traînée aérodynamique sur l'ensemble du système cycliste - vélo. En effet, afin de rester fidèle à la thématique de ce travail, c'est d'avantage l'influence d'un composant matériel ou d'un équipement sur la $P_{méca}$ produite par un cycliste qui nous intéresse, plutôt qu'une valeur brute de SC_x .

De manière à considérer l'influence globale au niveau aérodynamique de chaque équipement ou matériel testé, les valeurs de $P_{méca}$ étaient moyennées en rassemblant 1) les conditions avec vent de face, 2) les conditions avec les angles des vents compris entre 0 et 20° et 3) l'ensemble des conditions. En effet, lors d'épreuves CLM, une multitude de conditions de vitesse et de vent sont rencontrées en fonction du profil du parcours, du vent, des changements de direction, ce qui justifie la nécessité de considérer l'influence sur la traînée aérodynamique dans sa globalité. Les différences relatives entre chaque essai (en %) étaient exprimées à partir des estimations de $P_{méca}$ en comparaison à une condition de référence. Le calcul des gains ou pertes chronométriques (en sec/km) pour une même $P_{méca}$ produite permettait d'illustrer de manière plus concrète les différences.

En ce qui concerne la reproductibilité des mesures avec cette méthode, elle a été évaluée par les ingénieurs de chez ACE et confirmée par certains de nos essais. Ainsi, une différence entre deux mesures était considérée comme significative lorsqu'elle dépassait :

- 2% dans le cas où le sujet testé était un cycliste qui pédalait,
- 1% dans le cas où le sujet testé était un cycliste qui restait immobile,
- 0,5% dans le cas où le sujet testé était le mannequin.

2. Tests en conditions réelles de locomotion sur vélodrome

2.1. Le vélodrome

Les sessions sur vélodrome se sont déroulées sur le vélodrome couvert « Jean Stablinski » de Roubaix. Ce vélodrome a été inauguré en 2012 et possède une piste en bois de 250 m (figure 63).

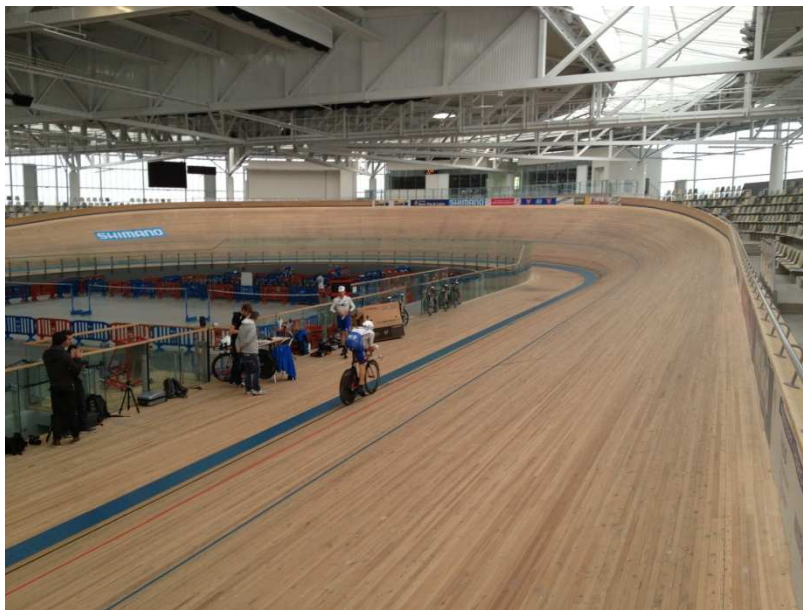


Figure 63 Vélodrome couvert de Roubaix

Les sessions sur vélodrome ont l'avantage de se dérouler dans des conditions environnementales stables. En étudiant les relations entre la vitesse de déplacement et la $P_{\text{méca}}$ produite, il devient possible de comparer directement l'influence aérodynamique d'une position ou du matériel. Ces essais en situation réelle de déplacement font état d'une bonne reproductibilité entre les mesures, ce qui justifie leur utilisation pour comparer la traînée aérodynamique d'équipement ou de composant matériel (Gonzalez-Haro, Galilea Ballarini, *et al.*, 2007 ; Grappe, 2009 ; Garcia-Lopez *et al.*, 2014).

2.2. Protocole expérimental

Un capteur de puissance SRM (Schoberer Rad Messtechnik, Julich, Germany) était installé sur le vélo de chaque cycliste de manière à enregistrer en continu la $P_{\text{méca}}$ (échantillonnage : 1 Hz). Chaque session d'essai consistait à réaliser un protocole incrémental de 12 min où la

vitesse augmentait progressivement de minute en minute entre 30 km/h et 50,2 km/h (tableau 5). L'incrément de vitesse était calculé pour être équivalent à un incrément de 30 W. La puissance augmentant avec le cube de la vitesse, les incréments de vitesse étaient de plus en plus faible afin de garder un incrément de puissance constant durant le test. Une bande son, éditée avec le logiciel MookyBeeper (Matsport, Saint Ismier, France), permettait de déterminer la vitesse cible de chaque palier aux cyclistes en émettant un bip sonore à chaque demi-tour de piste. Les cyclistes devaient ainsi réguler leur vitesse de manière à passer la ligne de poursuite à chaque demi-tour (milieu de chaque ligne droite) en même temps qu'un bip sonore. Un test incrémental était réalisé pour chaque essai de matériel ou d'équipement. Afin d'évaluer l'influence du matériel ou d'un équipement sur la traînée aérodynamique à partir de cette méthode, les résistances au roulement étaient standardisés avec l'utilisation de la même paire de roues (avec mêmes boyaux et mêmes pression de gonflage) pour chaque essai.

Tableau 5 Protocole incrémental de test sur vélodrome

Minutes	Vitesse	Temps au demi-tour (125 m)
1	30,0 km/h	14,9 sec
2	33,0 km/h	13,6 sec
3	35,6 km/h	12,6 sec
4	37,8 km/h	11,9 sec
5	39,8 km/h	11,3 sec
6	41,6 km/h	10,8 sec
7	43,3 km/h	10,4 sec
8	44,9 km/h	10,0 sec
9	46,3 km/h	9,7 sec
10	47,7 km/h	9,4 sec
11	49,0 km/h	9,1 sec
12	50,2 km/h	8,9 sec

2.3. Analyse des résultats

L'analyse de la vitesse de déplacement et de $P_{\text{méca}}$ pour chaque essai permettait d'évaluer la résistance aérodynamique du composant ou du matériel testé à partir du calcul du SC_x . En effet, pour une condition donnée, plus la $P_{\text{méca}}$ était faible à une même vitesse, meilleure était

la pénétration dans l'air. La méthode consistait à tracer la relation entre la vitesse et la $P_{méca}$ à partir de chaque pallier du test incrémental.

De la même manière que pour les essais en soufflerie, l'analyse des résultats s'effectuait sur la base des $P_{méca}$ estimées à partir de la relation moyenne vitesse - $P_{méca}$ obtenue sur le test incrémental. Par conséquent, l'influence d'un équipement ou d'un composant matériel sur la traînée aérodynamique était évalué à partir des variations de $P_{méca}$ (en %) par rapport à une condition de référence. L'analyse des SC_x brutes était également possible à partir de la méthode d'analyse de régression linéaire entre la vitesse de déplacement au carré et la résistance totale au déplacement mais ces valeurs étaient sous estimées en raison de la force centrifuge dans les virages (Olds, 2001 ; Garcia-Lopez *et al.*, 2014). Cependant, comme expliqué précédemment, ce sont d'avantage les différences de $P_{méca}$ relatives entre les essais qui nous permettaient de déterminer les différences. Ainsi, les $P_{méca}$ de chaque test de matériel ou d'équipement ont été calculées et comparées pour des vitesses de 40, 45 et 50 km/h.

Remarque : pour que le test soit valide, il fallait que les cyclistes roulent avec la plus grande stabilité possible lors des différents paliers afin que la $P_{méca}$ moyenne soit réalisée avec le moins de périodes d'accélération et de décélération. Pour ce faire, des tests d'habituations ont été réalisés par les coureurs.

3. Modélisation numérique de la mécanique des fluides (CFD)

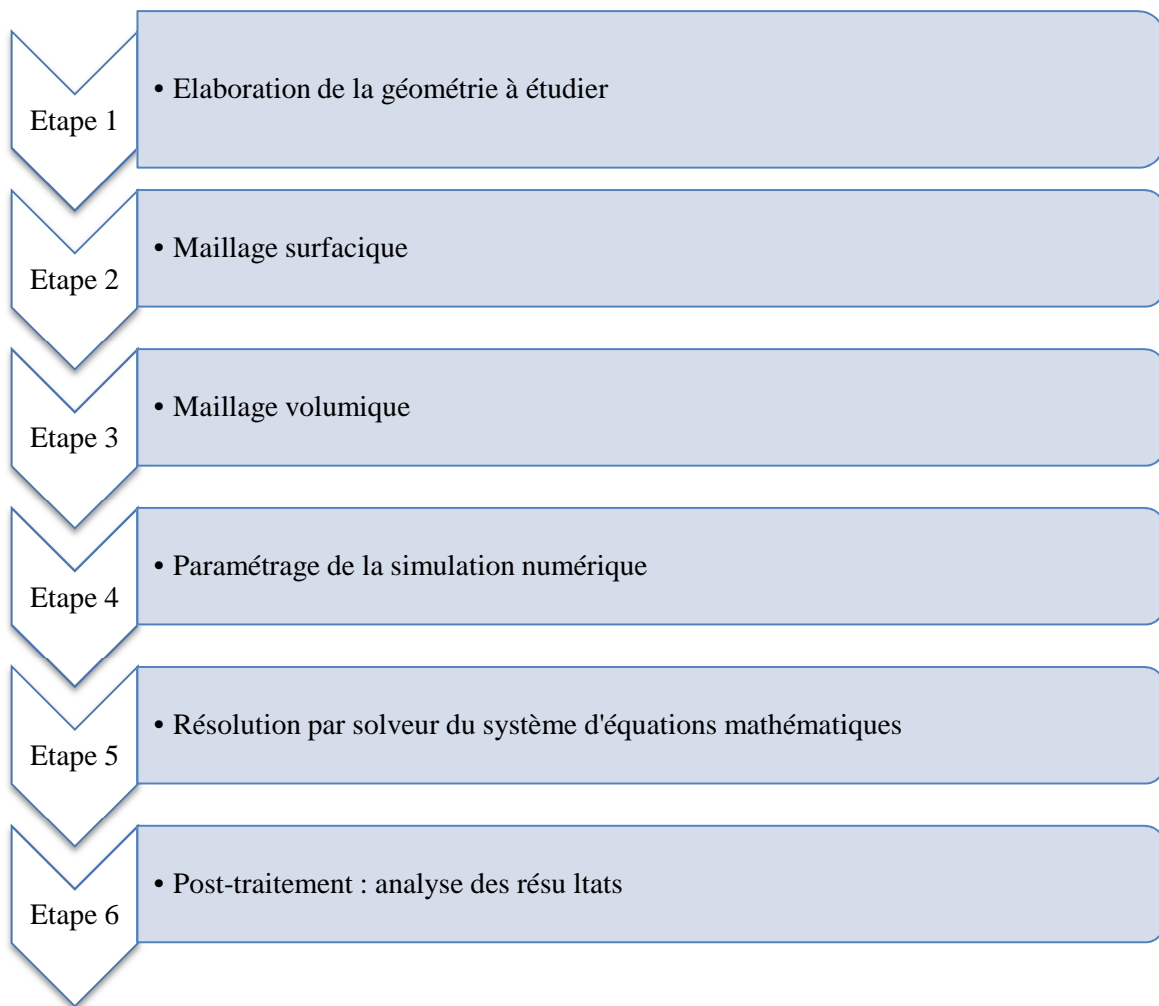
La modélisation numérique de la mécanique des fluides (CFD) a pour objectif d'évaluer la traînée aérodynamique de l'ensemble cycliste - vélo mais également d'apporter une meilleure compréhension de l'écoulement de l'air autour de ce système. Ainsi, elle permet l'analyse des phénomènes aérodynamiques se produisant dans la couche limite, ce qui permet de détailler plus précisément l'impact de chaque partie du système cycliste - vélo sur la traînée aérodynamique globale. Cette technique, relativement récente dans le domaine du cyclisme, a été utilisée dans différentes études sur l'optimisation de la position (Defraeye *et al.*, 2010b, 2011a, 2011b ; Blocken *et al.*, 2013 ; Defraeye *et al.*, 2013) ou du matériel (Godo *et al.*, 2009, 2010, 2011). Néanmoins, cette méthodologie très complexe nécessite d'être parfaitement maîtrisée pour obtenir des résultats valides.

3.1. Démarche méthodologique

Dans le cas de nos travaux, la société ACE, experte dans ce domaine, s'est chargée de la réalisation des études CFD. Les résultats de ces études étaient donc obtenus dans le cadre de prestations commerciales à la charge de l'équipe et des partenaires. ACE n'a pas souhaité communiquer les détails de la méthodologie utilisée pour préserver une certaine confidentialité. En effet, cette société expérimente la méthode CFD depuis une dizaine d'années dans l'automobile, et s'est intéressé ces dernières années à cette méthode dans le cyclisme. Il convient de souligner que la maîtrise de cette méthode en cyclisme est bien plus complexe que dans l'automobile, où la forme géométrique étudiée est beaucoup plus simple.

Le principe de la CFD est équivalent à la méthode des éléments finis en mécanique des structures, mais en volume finis, car le problème considéré en aérodynamique est volumique. Un calcul CFD correspond à l'essai d'une condition (un équipement, un composant matériel ou une position) avec une vitesse et un angle de vent. Le tableau 6 présente les étapes successives de réalisation d'un calcul CFD.

Tableau 6 Etapes de réalisation d'un calcul CFD



Etape 1 : conception de la géométrie à étudier

Au cours de cette première étape, l'objectif est d'avoir en version numérique (fichier CAO) la géométrie de l'objet ou ensemble à étudier en 3D (figure 64). Dans le cas du système cycliste - vélo, le scanning du cycliste est nécessaire (procédé identique à l'étape n°1 de fabrication du mannequin). Le logiciel utilisé pour dessiner et concevoir le fichier CAO était Catia (Catia V5, 3DS, Paris, France).

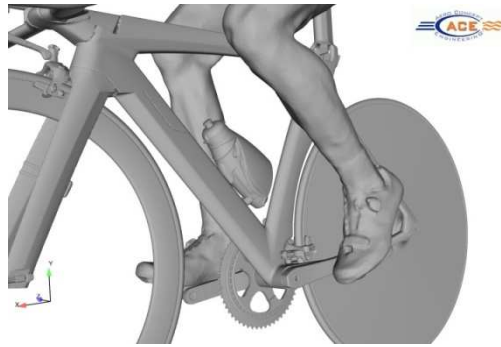


Figure 64 Image d'un fichier CAO finalisé d'un cycliste sur vélo de CLM

Etape 2 : Maillage surfacique

La conception du maillage surfacique consiste en la décomposition des surfaces du système à tester et des limites du domaine (murs d'une soufflerie virtuelle, sol) grâce à des triangles ou des quadrangles (figure 65). La difficulté dans l'approche du système cycliste - vélo est la multitude de surfaces différentes dont il convient de trouver les bons maillages. Le logiciel de maillage surfacique utilisé était ANSA (ANSA pre-processor, CAE Systems SA, Thessalonique, Grèce).



Figure 65 Exemple de maillage surfacique dans une étude CFD (Godo et al., 2011)

Etape 3 : Maillage volumique

Le maillage volumique consiste à définir l'épaisseur du volume de la couche limite en extrudant les triangles du maillage surfacique de l'ensemble cycliste - vélo en plusieurs couches de prismes selon les zones de cet ensemble (figure 66). Il s'agit également de mailler

de la même manière les surfaces du domaine d'essai (murs de la soufflerie virtuelle) et le volume libre entre ces surfaces. Le logiciel utilisé pour la conception du maillage volumique était T-Grid (ANSYS, Canonsburg, USA).

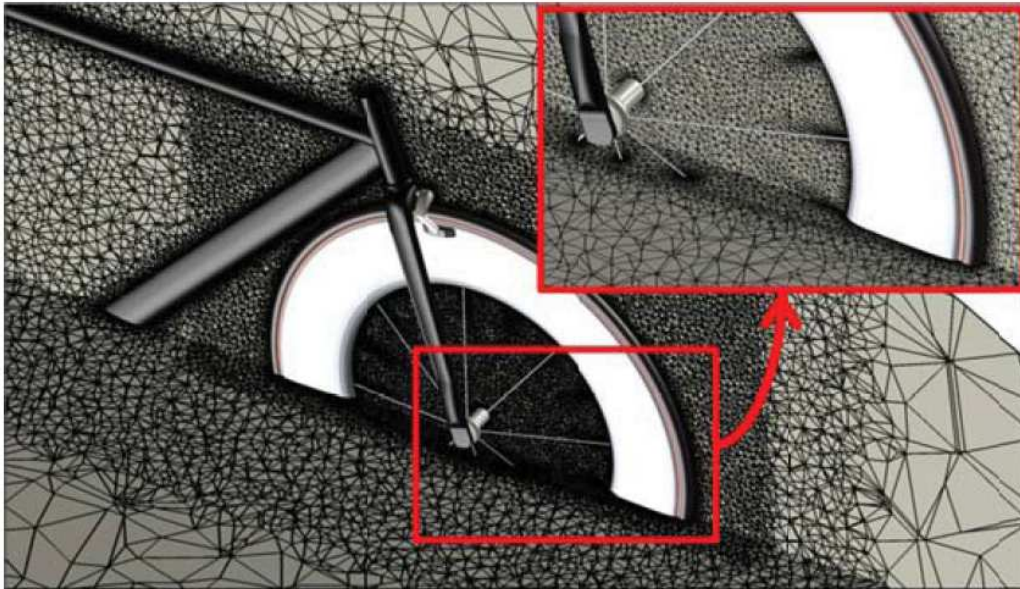


Figure 66 Exemple de maillage volumique dans une étude CFD de roues (Godo et al., 2011)

Ces deux étapes sont très importantes dans le processus de préparation du système qui va être ensuite étudié mathématiquement. La qualité du maillage a une influence directe sur la convergence, la précision de la solution et sur le temps de calcul. Ainsi, une bonne résolution permet de mieux décrire les phénomènes physiques liés à la couche limite mais augmente le temps de calcul. Il s'agit de trouver le bon compromis entre la précision de la géométrie du maillage, la durée de calcul (qui va influencer son coût) et la méthode de calcul.

Etape 4 : Paramétrage de la modélisation numérique

Cette étape consiste à paramétrer la phase de résolution par calculs mathématiques des phénomènes aérodynamiques qui se déroulent autour du système étudié. Au cours de cette étape, il convient de :

- Poser les équations résolues par le solveur : équations de la dynamique des fluides (Navier et Stokes, Euler...) : 6 équations à 7 inconnus.

- Choisir le modèle de turbulence : stationnaire ou instationnaire. Le choix est également une question de compromis. Le calcul par méthode stationnaire est intéressant pour un résultat rapide puisqu'on simplifie l'écoulement autour du système étudié. La méthode instationnaire prend en considération les mouvements ou phénomènes physiques non stabilisés dans l'écoulement c'est-à-dire un sillage oscillant comme par exemple, un battement de sillage derrière l'épave qui apparaît à une certaine fréquence. Le choix de la méthode instationnaire augmente considérablement le temps et le coût des calculs puisque la durée de résolution est beaucoup plus longue.
- Définir les caractéristiques du fluide en l'occurrence de l'air (vitesse d'entrée dans le domaine, champ de pression...)
- Fixer les conditions aux limites en fixant des hypothèses sur chaque inconnu dans les différentes équations. C'est principalement à ce niveau, que se différencie les méthodologies de CFD et que le savoir-faire de chaque expérimentateur intervient.

Etape 5 : Résolution par solveur du système d'équations mathématiques

Cette étape est la phase de calculs où le solveur cherche à résoudre le système d'équations mathématiques de façon itérative à partir des conditions qui ont été posées. Le solveur résout les équations aérodynamiques dans l'ensemble des cellules du maillage un certain nombre de fois afin de les faire converger vers une solution valide. La solution dite convergée est celle où les inconnues des différentes équations vont dans le même sens. La durée de ces étapes est fonction du paramétrage du système de calculs. Ils existent deux logiciels utilisés pour cette étape selon la configuration des calculs : Fluent (ANSYS, Canonsburg, USA) et Open Foam (OpenCFD Ltd., Bracknell, Grande Bretagne).

Etape 6 : Post-traitement : analyse des résultats

L'analyse des résultats s'effectue avec les logiciels de résolution CFD, précédemment cités ou des logiciels spécifiques de post-processing tel Enight (CEI Inc., Apex, USA). Les résultats et comparaisons, issus de la modélisation numérique, renseignent sur la traînée aérodynamique globale du système étudié mais détaillent également l'influence de chaque composant. La visualisation en 2D ou 3D des flux et des efforts sur chaque surface est possible, tout comme la création d'animations retraçant le chemin des particules d'air.

La méthode CFD possède les avantages liés à certains inconvénients de la méthode en soufflerie. En effet, ces essais ne nécessitent pas la présence des athlètes, et des biais méthodologiques qui en découlent. Cela permet ainsi d'accélérer la durée des processus de recherche puisque les essais peuvent s'enchaîner plus rapidement comme les améliorations des composants testés sont plus simples à réaliser de manière numérique qu'avec des prototypes physiques. Elle permet également de supprimer les biais méthodologiques liés à l'appareil de mesure en soufflerie. Enfin, c'est aujourd'hui la méthode capable d'analyser le plus précisément les phénomènes physiques qui se déroulent dans la couche limite.

Cependant, elle possède certaines limites, notamment méthodologiques, puisque l'expérimentateur est garant du résultat obtenu puisque c'est lui qui fixe avec sa sensibilité et son savoir-faire les conditions de calculs. Par exemple, il convient de souligner qu'avec la méthode CFD, la simulation de rotation des roues s'opère de deux manières : soit la roue ne tourne pas et une condition est posée sur la paroi, soit le maillage de la roue est mise en rotation à une vitesse cible. La différence entre ces deux conditions est la durée de calcul puisqu'elle est multipliée par 11 dans le deuxième cas (800 h de calcul CPU contre 70 h). Une autre limite est le besoin de grandes capacités de ressources hardware (ACE a une capacité de 450 processeurs avec 1,5 tera de Ram), software et humaines. Enfin, il convient de noter que cette technique étant relativement récente dans le domaine de l'étude du système cycliste - vélo, il convient de vérifier la validité des résultats obtenus avec les méthodes décrites précédemment (vélodrome, soufflerie...).

3.2. Méthodologie utilisée

La méthode CFD a été utilisée pour le développement du cadre de CLM. Plusieurs cadres de marques différentes ont été comparés, puis plusieurs essais ont porté sur des modifications de la géométrie du cadre Lapierre. Les essais de chaque cadre ont été réalisés dans quatre configurations présentées dans le tableau 7 avec une méthode de calcul se basant sur un mode de turbulence stationnaire.

Tableau 7 Détails des configurations testées dans l'étude CFD

Condition	Vitesse déplacement	Vitesse vent météo	Angle vent météo
1 : sans vent	50,4 km/h	0 km/h	0°
2 : vent de face	50,4 km/h	18 km/h	0°
3 : vent de dos	50,4 km/h	18 km/h	180 °
4 : vent $\frac{3}{4}$ face	50,4 km/h	18 km/h	75°

3.3. Analyse des résultats

L'analyse des résultats s'est effectué sur la comparaison des écarts relatifs de $P_{méca}$ en comparaison au cadre référence Lapierre, utilisé par l'équipe au début de ce projet R&D, sur :

- La $P_{méca}$ totale de l'ensemble cycliste – vélo,
- la $P_{méca}$ cycliste,
- la $P_{méca}$ vélo,
- la $P_{méca}$ cadre,
- la $P_{méca}$ fourche,
- la $P_{méca}$ roues,
- la $P_{méca}$ composants matériels.

De plus, ACE fournissait pour chaque essai trois fichiers permettant de visualiser :

- la répartition des forces de pression sur la surface de l'ensemble cycliste - vélo,
- la répartition des forces de cisaillement (traînée de frottement) sur la surface de l'ensemble cycliste - vélo,
- l'écoulement du flux d'air sur un plan transversal.

Ces visualisations ont ainsi permis de mieux comprendre l'écoulement des flux et interpréter l'influence des modifications apportées entre chaque essai sur la traînée aérodynamique (figures 67 et 68).

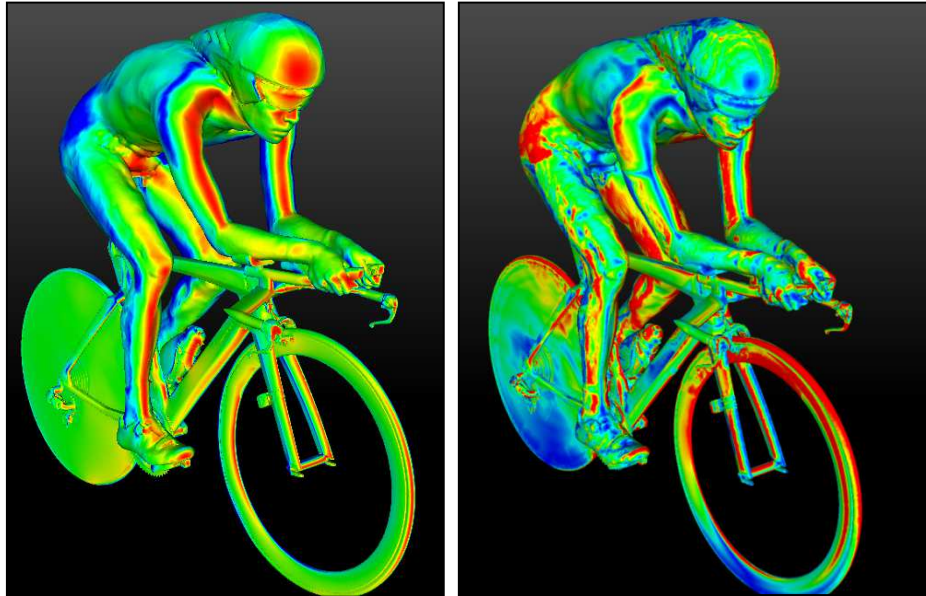


Figure 67 Visualisations des forces de pression (à gauche) et de cisaillement (à droite) sur l'ensemble cycliste – vélo

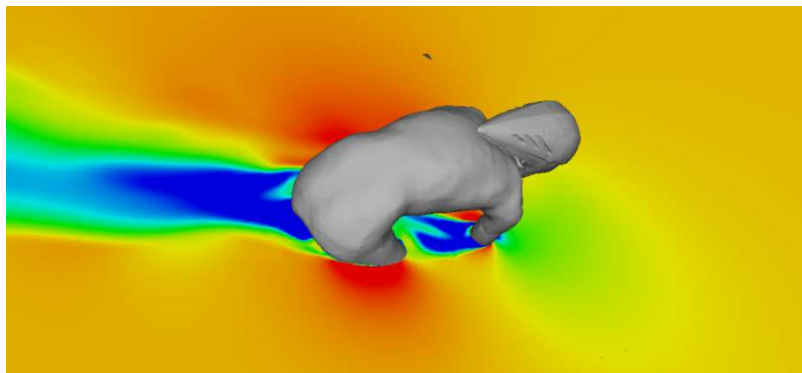
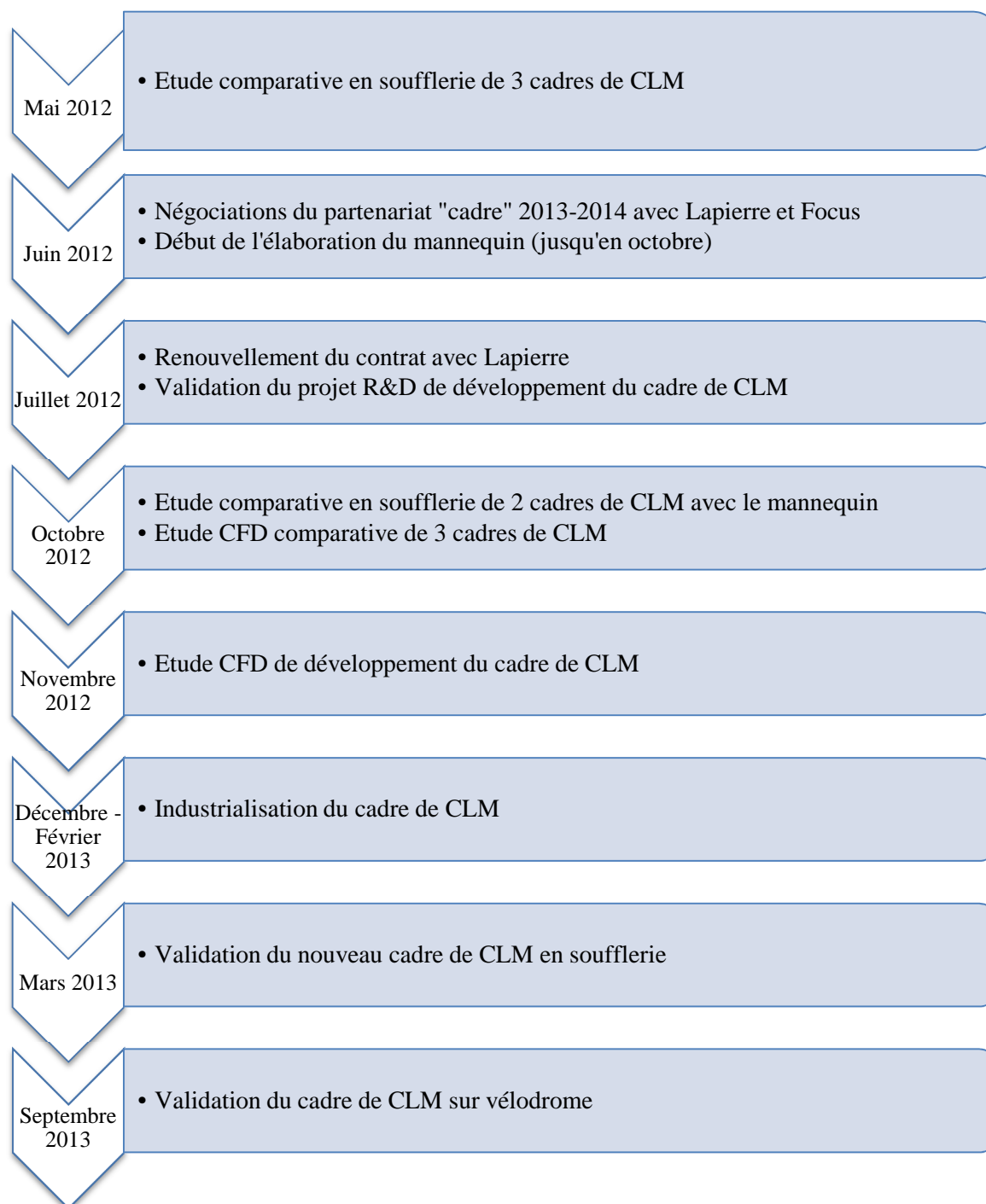


Figure 68 Visualisation sur un plan transversal de l'écoulement du flux d'air

CHAPITRE 2 : Etude du développement d'un cadre de CLM



La société Lapierre est le partenaire fournisseur des cadres de l'équipe FDJ depuis 2002. Jusqu'en 2012, l'équipe n'intervenait pas dans les processus de développement des différents cadres utilisés par les cyclistes (course en ligne, CLM, cyclo-cross...). Lapierre produisait des cadres qu'elle mettait à disposition de certains coureurs testeurs (maximum 3) qui validaient le cadre ou demandaient quelques ajustements au gré de leurs ressentis. En ce qui concerne le

vélo de CLM, le cadre étant un élément central, aucune recherche n'avait été précédemment menées en soufflerie ou en CFD afin de minimiser la traînée aérodynamique du cadre en tenant compte de son interface avec les autres composants. Les cadres de CLM étaient dessinés par les ingénieurs industriels puis industrialisés sans jamais être validés. La priorité de ce travail entrepris avec nos différents partenaires a donc en priorité concerné l'optimisation du cadre de CLM pour donner en parallèle une véritable image de performance à l'équipe et au constructeur.

1. Etude comparative de trois cadres de CLM en soufflerie

La première étape de ce projet R&D est intervenue en même temps que les négociations pour le contrat de partenariat du fournisseur de cadres portant sur 2013 – 2014. Lapierre souhaitait poursuivre son partenariat alors qu'une société allemande Focus s'intéressait à collaborer avec notre équipe. Afin de justifier l'ajout d'une clause dans le contrat sur le développement d'un cadre de CLM performant, il a été nécessaire de comparer les performances aérodynamiques des cadres de CLM de ces sociétés et les comparer au cadre d'une marque faisant référence dans le domaine du développement de cadres performant. Ainsi, nous nous sommes procurés un vélo de CLM Focus et un vélo de CLM Specialized SHIV afin de réaliser une étude comparative en soufflerie, en les comparant avec le cadre Lapierre utilisé par l'équipe lors des deux saisons précédentes. Le cadre Specialized SHIV est considéré dans le milieu cycliste comme l'un des cadres les plus performants sur le plan aérodynamique avec des formes de tubes optimisés et une intégration perfectionnée des différents composants (freins, potence, tige de selle...). L'objectif était de quantifier les différences de performance en terme aérodynamique entre ces trois modèles et de sensibiliser ces partenaires sur la nécessité de conduire des recherches sur l'aérodynamisme de leur cadre de CLM afin de l'améliorer.

Le tableau 8 présente les conditions expérimentales des essais des cadres de CLM (figure 69).

Tableau 8 Matériels et équipements pour l'étude comparative de cadres de CLM

	Essai n°1 : Lapierre (Référence)	Essai n°2 : Specialized	Essai n°3 : Focus
Protocole	n°1	n°1	n°1
Casque	Uvex Race 4	Uvex Race 4	Uvex Race 4
Combinaison	Moa 2011	Moa 2011	Moa 2011
Couvre-chaussures	Specialized	Specialized	Specialized
Cadre	Lapierre CLM 2012	Specialized SHIV TT	Focus Chrono
Groupe	Shimano Di2	SRAM Red	Shimano Duraace
Roues	Av : Shimano C50 Ar : Pro Textreme	Av : Shimano C50 Ar : Pro Textreme	Av : Shimano C50 Ar : Pro Textreme
Kit bidon	sans	sans	sans



Figure 69 Vélos de CLM Lapierre, Focus et Specialized

La géométrie de ces trois cadres et les différents composants périphériques (potences, cintres...) étant différents, il était nécessaire d'optimiser les réglages afin que le cycliste ait exactement la même position sur les trois vélos. En effet, comme l'objectif était de comparer la performance des cadres, il était important que tous les autres éléments pouvant influencer la traînée aérodynamique soient standardisés. Les vélos testés étaient intégralement montés, seuls les systèmes de transmission différaient entre les cadres. L'ensemble cintre – potence faisant partie du cadre Specialized, cette interface était comparée avec celle utilisée par

l'équipe FDJ où la potence Lapiere est conçue pour être installée avec le cintre Pro. Des photos vues de face et de profil validaient à chaque fois la position du coureur, qui ne pédalait pas pendant les essais.

Résultats

Les résultats sont significatifs : la pénétration dans l'air était significativement meilleure avec le vélo Spécialized (-1,5%) comparé au vélo Lapiere avec des gains moyens de 4,0% avec les vents d'angle 0° (figure 70). Dans ces conditions, les gains chronométriques avec le vélo Spécialized atteignaient 1,2 km/h pour une même $P_{méca}$. Pour des angles de vents de 10°, les différences (+1,0%) n'étaient pas significatives entre les cadres Spécialized et Lapiere mais ce dernier avait tendance à être plus performants avec des vents de côté. En ce qui concerne le cadre de CLM Focus, il était moins performant en moyenne de 1,3%, ce qui équivalait à des pertes chronométriques de 0,4 sec/km pour une même $P_{méca}$ produite par rapport au cadre Lapiere.

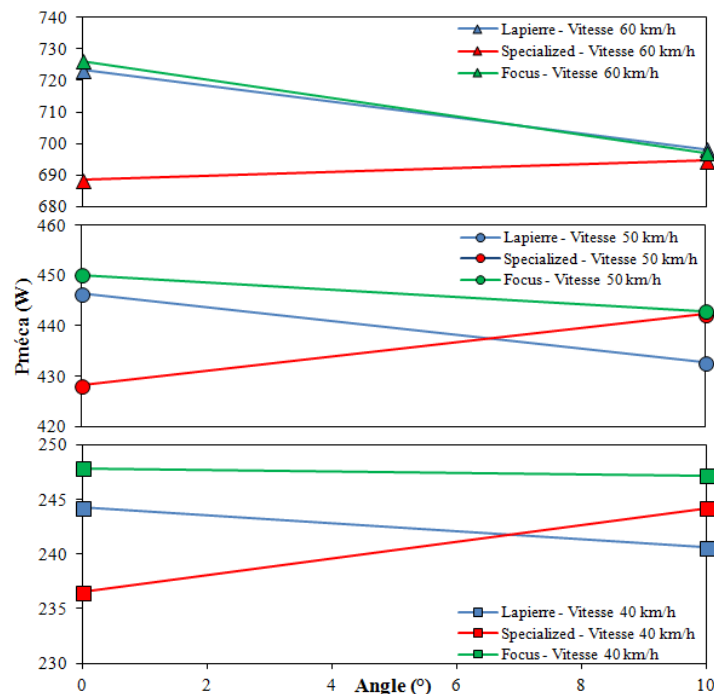


Figure 70 Relations $P_{méca}$ – angle du vent aux différentes vitesses des trois cadres de CLM

Ces résultats confirment la nécessité pour ces deux sociétés de développer un cadre de CLM plus performant afin d'être au niveau du cadre Spécialized SHIV. Dans la négociation du

contrat de partenariat, l'équipe a demandé l'ajout d'une clause afin de pouvoir développer un cadre de CLM à partir d'une méthodologie de R&D dans laquelle nous serions acteurs aux côtés des ingénieurs de la société. Ainsi, le renouvellement de contrat avec Lapierre s'est effectué avec un renforcement de la collaboration sur les projets de développements des cadres entre le département R&D de l'équipe FDJ et l'ingénieur Lapierre.

Une première réunion de travail en juillet 2012 a ainsi permis d'élaborer et valider collégalement le processus de développement d'un nouveau cadre de CLM, dénommé Aerostorm, dans un cahier des charges. L'objectif annoncé était de développer un nouveau cadre de CLM optimisant l'interface entre les différents composants du vélo afin d'obtenir une traînée aérodynamique de l'ensemble cycliste - vélo plus faible avec le nouveau cadre Lapierre comparé au cadre Specialized SHIV. Au premier regard, il semble qu'un important travail de développement soit mené sur l'avant du vélo c'est-à-dire au niveau de l'ensemble fourche – frein – cintre – potence. Les systèmes tout intégré du Specialized et des nouveaux vélos de CLM performants (Trek, Cervelo...) semblent améliorer considérablement la pénétration dans l'air. L'utilisation de la méthode CFD devrait permettre de confirmer cela en étudiant l'impact sur la traînée de chaque partie des cadres afin de cibler les endroits qu'il convient prioritairement d'optimiser. Nos partenaires des composants périphériques Pro et Shimano imposant l'utilisation du cintre et des roues de CLM, il convenait donc de réaliser un cadre permettant d'optimiser l'interface avec ces éléments. Le projet de développement du cadre de CLM s'est donc orienté vers la comparaison du cadre de CLM Lapierre utilisé en 2012 par les coureurs de l'équipe avec deux cadres de marques concurrentes aux géométries et intégrations innovantes des composants (Specialized et Trek) grâce à l'utilisation de la méthode CFD maîtrisée par ACE. Après l'analyse des résultats de l'étude comparative CFD, Rémi Gribaudo, l'ingénieur Lapierre a dessiné en CAO des nouveaux modèles de cadres avant de les évaluer avec les calculs CDF. La validation du modèle définitif a été conclue collégalement entre Lapierre et l'équipe FDJ avant de lancer l'usinage des moules, première étape dans l'industrialisation des cadres. Le timing était relativement serré puisque les coureurs devaient disposer du nouveau cadre pour les premières épreuves CLM de la saison 2013 (mars).

2. Etude comparative des cadre de CLM Lapierre et Specialized avec utilisation du mannequin

Avant l'étude comparative réalisée par la méthode CFD, une session en soufflerie ayant pour but de comparer les cadres Lapierre et Specialized avec le mannequin a été organisée (figure 71). Les objectifs étaient doubles puisqu'il s'agissait de confirmer, par une méthodologie permettant une meilleure précision dans les essais grâce à l'utilisation du mannequin, les écarts précédemment mesurés (avec un cycliste) entre ces deux cadres mais également de permettre la comparaison des résultats obtenus via la CFD avec la méthode expérimentale de soufflerie.

Le tableau 9 présente les conditions expérimentales des essais des cadres de CLM avec le mannequin.

Tableau 9 Matériels et équipements pour l'étude comparative des cadres Lapierre et Specialized avec le mannequin

	Essai n°1 : Lapierre (Référence)	Essai n°2 : Specialized
Protocole	n°2	n°2
Casque	Uvex Race 6	Uvex Race 6
Combinaison	Moa CLM	Moa CLM
Couvre-chaussures	Moa CLM	Moa CLM
Cadre	Lapierre CLM 2012	Specialized SHIV TT
Groupe	Shimano Di2	Shimano Di2
Roues	Av : Shimano C50 Ar : Pro Textreme	Av : Shimano C50 Ar : Pro Textreme
Kit bidon	sans	sans



Figure 71 Mannequin positionné sur les cadres de CLM Lapierre et Specialized

Résultats

Les résultats confirment les différences déjà mesurées lors des tests précédents entre les vélos de CLM Lapierre et Specialized SHIV (tableau 10 et figure 72). Un gain moyen de 2,1% de $P_{méca}$ avec le SHIV a été observé contre 1,6% lors des essais avec un coureur. Cependant, les résultats diffèrent lorsqu'on distingue les vents de face et de côté. Avec le mannequin, les gains avec les vents de face n'étaient que de 1,6% (contre 4% précédemment) alors qu'avec les vents de côté les gains étaient cette fois en faveur du Specialized avec -2,3%. Ces différences entre les sessions peuvent s'expliquer par le fait qu'avec le coureur, le vélo Specialized était monté avec des composants SRAM, où les dérailleurs mécaniques sont moins volumineux, et que l'ensemble potence - cintre était spécifique Specialized. Lors de ces derniers essais, une potence et un cintre Pro étaient montés afin d'être dans les conditions qui sont imposées par les partenaires de l'équipe FDJ et qui seront celles de l'étude CFD.

Tableau 10 Différences relatives de $P_{méca}$ entre les cadres Lapierre et Specialized selon les conditions de vent

	Angle 0°	Angles 0 à 20°	Moyenne globale
Essai 1 : Lapierre	Réf.	Réf.	Réf.
Essai 2 : Specialized	-1,6%	-2,3%	-2,1%

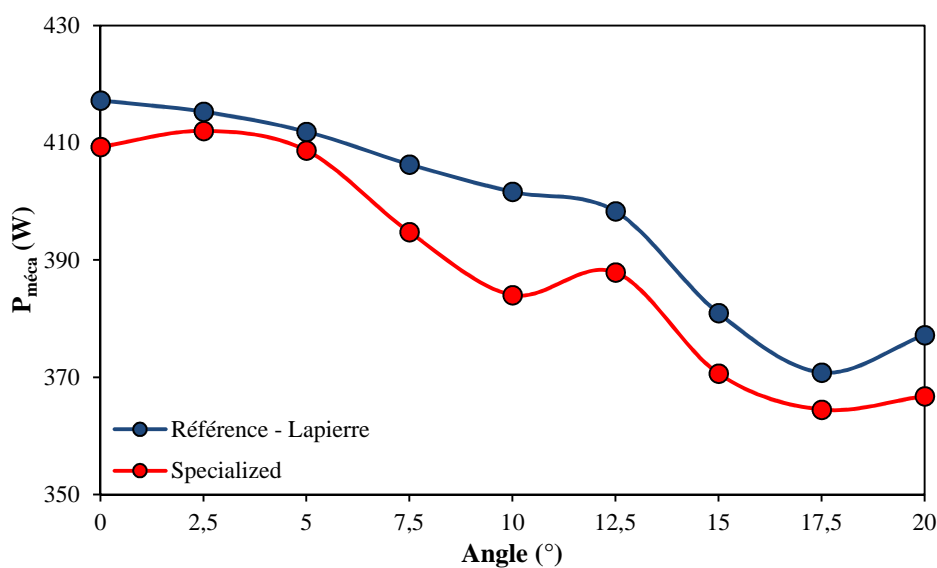


Figure 72 Relations $P_{méca}$ – angle du vent à 50 km/h des cadres de CLM Lapierre et Specialized

3. Etude CFD comparative de 3 cadres de CLM

La comparaison entre les cadres de CLM Lapierre, Specialized et Trek a été réalisée avec l'étude CFD. Les différents cadres étaient équipés des mêmes composants périphériques, qui sont ceux utilisés par l'équipe lors de la saison 2012, et du même cycliste dans la même position. Comme décrit précédemment, les cadres ont été testés dans quatre configurations différentes de vent.

Résultats

L'étude comparative des cadres de CLM Lapierre, Specialized et Trek, réalisée avec la méthode CFD, montre que la traînée aérodynamique du système cycliste - vélo est significativement plus faible avec les cadres Specialized (-15,4 W) et Trek (-13,0 W) par rapport à celle avec le cadre Lapierre utilisé en 2012 par les coureurs de l'équipe. Les différentes configurations de vent mettent en évidence que les performances aérodynamiques globales sont systématiquement meilleures avec le cadre Specialized. L'analyse des différents composants du système montre que l'interface entre le cycliste et son vélo diffère en fonction du cadre et des configurations de vent. En effet, les différentes parties du corps du cycliste vont généralement mieux pénétrer avec les cadres Specialized et Trek, notamment en raison d'une diminution de la traînée induite par le cadre et ses composants. Cela suggère qu'une meilleure intégration des composants périphériques et de la géométrie des tubes du cadre permet d'améliorer l'écoulement du flux d'air et ainsi probablement de diminuer les écoulements turbulents, prenant naissance au niveau des composants matériels, qui viennent s'écouler autour du cycliste. Comparé à la soufflerie, on observe que les écarts entre les différentes conditions sont légèrement plus importants avec la CFD.

D'autre part, on remarque qu'en analysant les différentes parties du vélo, ce n'est pas directement au niveau du cadre et de la fourche qu'ont lieu les gains aérodynamiques avec les modèles Trek et Specialized mais davantage au niveau des roues et des autres composants (tableau 11 et figure 73). Ce résultat montre que l'optimisation de l'intégration des roues et des différents composants est essentielle dans la diminution de la traînée aérodynamique globale avec un cadre de CLM puisque tous les composants étaient identiques sur les trois vélos.

Tableau 11 Détails des différences de $P_{méca}$ due à la traînée aérodynamique des composants du système cycliste - vélo avec les cadres Specialized et Trek en comparaison au Lapierre 2012 dans les 4 configurations d'essai

	Composants	Lapierre	Specialized (W)	Trek (W)
Config. 1 : Sans vent	Ensemble cycliste - vélo	Réf.	-10,1	-10,3
	Vélo	Réf.	-8,6	-10,9
	Cycliste	Réf.	-1,4	+0,6
	Cadre	Réf.	+0,3	+1,4
	Fourche	Réf.	+1,4	+2,3
	Roues	Réf.	-2,3	-2,4
	Autres composants	Réf.	-8,0	-12,2
Config. 2 : Vent de face	Ensemble cycliste - vélo	Réf.	-28,9	-24,5
	Vélo	Réf.	-18,2	-22,5
	Cycliste	Réf.	-10,7	-2,0
	Cadre	Réf.	+1,8	+3,8
	Fourche	Réf.	+4,1	+5,4
	Roues	Réf.	-6,6	-4,8
	Autres composants	Réf.	-17,5	-26,9
Config. 3 : Vent de dos	Ensemble cycliste - vélo	Réf.	-1,1	+0,9
	Vélo	Réf.	-1,8	-2,3
	Cycliste	Réf.	+0,7	+3,2
	Cadre	Réf.	-0,2	+0,3
	Fourche	Réf.	+0,2	+0,6
	Roues	Réf.	-0,1	-0,3
	Autres composants	Réf.	-1,7	-2,8
Config. 4 : Vent de côté	Ensemble cycliste - vélo	Réf.	-15,4	-13,0
	Vélo	Réf.	-12,0	-14,7
	Cycliste	Réf.	-3,3	+1,7
	Cadre	Réf.	+0,0	+2,4
	Fourche	Réf.	+2,2	+1,2
	Roues	Réf.	-5,9	-5,6
	Autres composants	Réf.	-8,3	-12,8

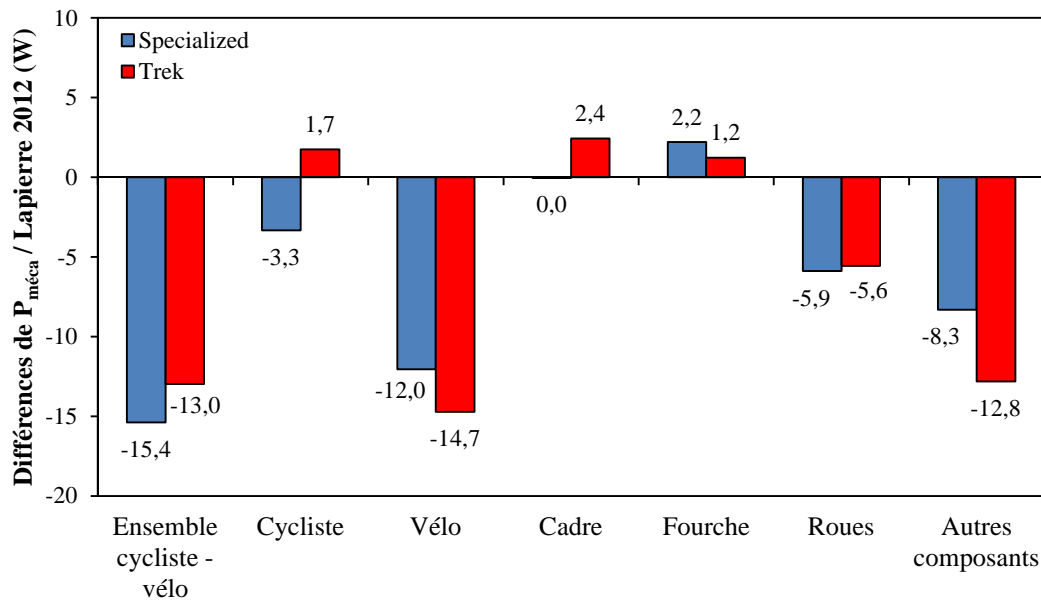


Figure 73 Différences moyennes de $P_{méca}$ due à la traînée aérodynamique des composants du système cycliste - vélo avec les cadres de CLM Specialized et Trek en comparaison du cadre Lapierre CLM 2012

L'analyse détaillée des différents composants des vélos avec les vents de face met en évidence que la traînée aérodynamique avec le cadre Lapierre est dégradée principalement au niveau de l'intégration 1) du frein avant dans la fourche, 2) du frein arrière au niveau des bases du cadre et 3) de la roue arrière avec le tube diagonal et le tube de selle. L'interface du cadre avec l'ensemble cintre – potence et la tige de selle sont également des parties où les cadres Specialized et Trek permettent d'améliorer l'aérodynamisme globale. Ces résultats chiffrés par les calculs CFD sont corroborés par l'analyse des fichiers de visualisation des traînées de pression et de frottement, comme on l'observe par exemple sur la figure 74. En ce qui concerne l'analyse des différents éléments du vélo avec les vents de côté, on note que c'est également au niveau du tube diagonal et du tube de direction, que la traînée aérodynamique est augmentée sur le cadre Lapierre.

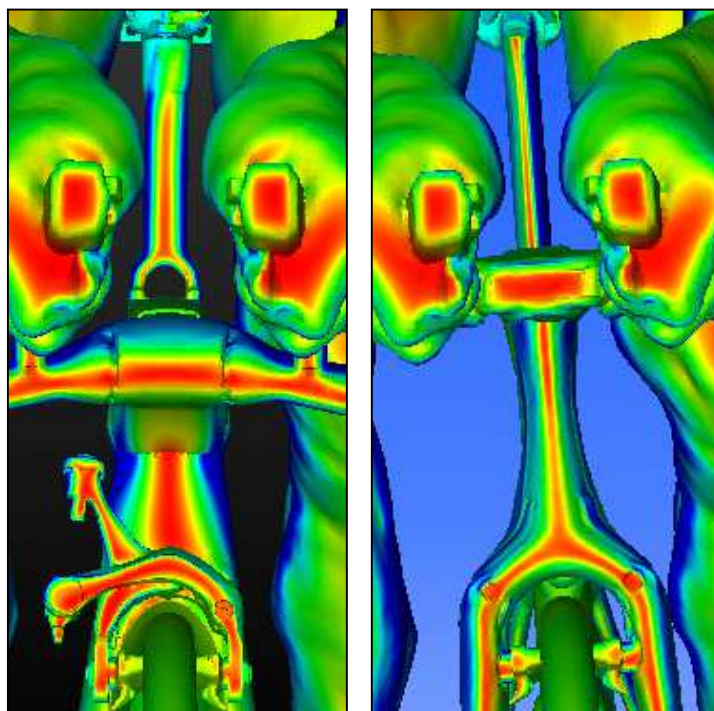


Figure 74 Forces de pression de l'écoulement de l'air exercées au niveau des freins avant, potences et tiges de selle dans la configuration n°1 (50 km/h sans vent) du cadre Lapierre (à gauche) et Trek (à droite).

L'objectif principal était d'atteindre avec le nouveau cadre Lapierre Aerostorm des résultats les plus proches possible de ceux obtenus avec le cadre Specialized SHIV dans les quatre configurations d'essai. L'ensemble des résultats montrent que le développement du cadre de CLM Lapierre doit être considéré dans les différentes configurations de vent (face et côté) autour de ces axes :

- Intégration du cintre et des prolongateurs ;
- Intégration du frein avant et du frein arrière ;
- Intégration de la roue arrière ;
- Géométrie des tubes diagonal, de selle et de direction ;
- Géométrie et intégration de la tige de selle.

A partir de ces axes de développement et du temps imparti pour la réalisation de ce projet, Lapierre a décidé de repartir du modèle du cadre de CLM 2012 et d'y apporter des modifications. Par conséquent, l'industrialisation n'a pas nécessité la création de nouveaux moules de fabrication qui constitue une étape relativement longue. Ainsi, les moules du précédent cadre de CLM ont été usinés à partir des nouvelles évolutions issues des études.

4. Etude CFD du développement du cadre Lapierre Aerostorm

Le développement du cadre Lapierre Aerostorm a été réalisé entre Rémi Gribaudo, l'ingénieur Lapierre, et la société ACE, qui réalisait les calculs CFD. Rémi proposait un fichier CAO du cadre avec certaines modifications qui étaient ensuite testées avec la méthode CFD. A partir des résultats obtenus, il apportait de nouvelles modifications au cadre qui étaient à nouveau testé et comparé aux résultats obtenus précédemment. Ce processus a été répété jusqu'à obtenir un cadre permettant d'avoir une traînée aérodynamique totale de l'ensemble cycliste – vélo inférieure dans les différentes configurations d'essai par rapport au cadre Specialized.

Voici les différentes étapes dans le développement du cadre Aerostorm, qui ont été réalisées à travers les différents fichiers CAO fournis par Lapierre :

- 1/ Intégrations des composants périphériques 2013 ;
- 2/ Intégrations du frein avant et du frein arrière ;
- 3/ Changement du profil de la fourche, du tube diagonal, de la tige de selle et des bases, amélioration de la potence ;
- 4/ Profil de tube kamm-tail du tube diagonal et de la tige de selle ;
- 5/ Repositionnement du bidon ;
- 6/ Avancement de la roue arrière de 7mm.

La version finale de l'Aerostorm comprenait les améliorations suivantes, répondant chacune aux points d'optimisation préalablement relevés après l'étude CFD comparative des 3 cadres :

- Intégration des étriers de frein avant dans la fourche (figure 77) ;
- Intégration du frein arrière sous le boîtier de pédalier (figure 78) ;
- Modification de la géométrie de la fourche (figure 77) ;
- Modification de la potence (figure 77) ;
- Tube diagonal sous forme kamm-tail (figure 79) ;
- Optimisation de l'intégration du kit bidon (figure 79) ;
- Intégration de la tige de selle sous forme kamm-tail (figure 76) ;
- Avancement de la roue arrière (figure 80) ;
- Modification des bases arrière (figure 80).

Il convient de noter que le profil de tube kammtail est une géométrie de tube récemment utilisée dans le développement de plusieurs cadres aérodynamiques, notamment du cadre de CLM Trek précédemment testé. Le principe consiste à tronquer la queue d'un tube ayant la forme d'une aile (figure 75). L'objectif est d'améliorer l'écoulement du flux d'air autour du

tube avec les vents de côté puisque cette forme favorise la création d'une queue d'aile virtuelle qui s'adapte à l'angle du vent pour retarder le décollement de la couche limite autour du tube de cette forme. Le tube diagonal et la tige de selle qui généraient d'importantes pertes aérodynamiques avec le vent de côté sur le précédent modèle possèdent cette géométrie de tube sur le modèle Aerostorm.

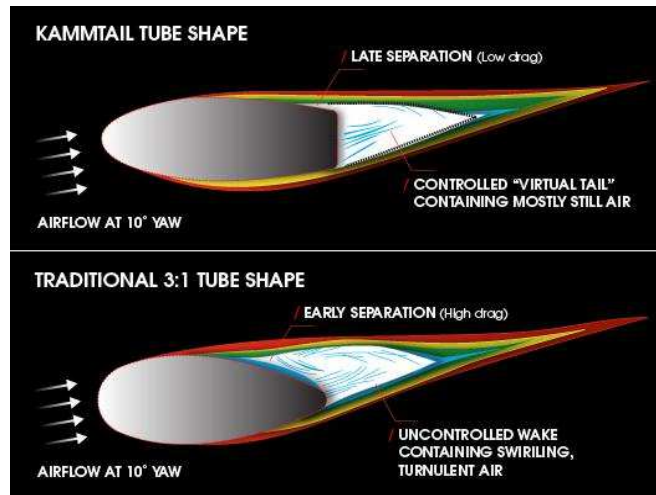


Figure 75 Visualisation de l'écoulement autour d'un tube kammtail (en haut) et d'un tube standard (<http://freelite.com/articles/trek-speed-concept-pg887.htm>)

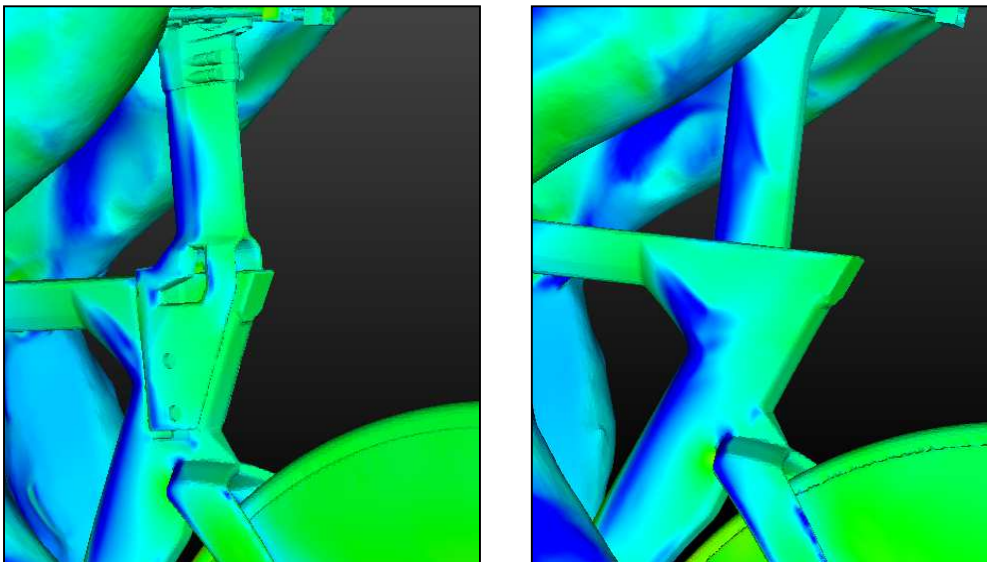


Figure 76 Forces de pression de l'écoulement de l'air exercées au niveau des tubes de selle et tiges de selle dans la configuration n°1 (50 km/h sans vent) du cadre 2012 et du cadre Aerostorm (à droite)

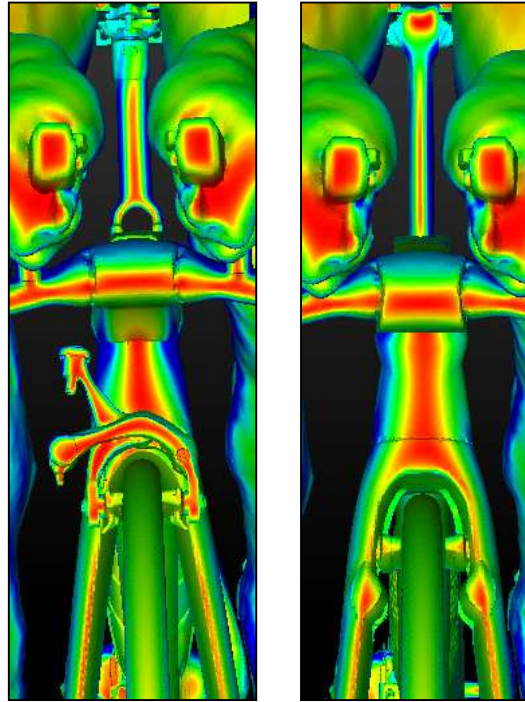


Figure 77 Forces de pression de l'écoulement de l'air exercées au niveau des freins avant, potences et tiges de selle dans la configuration n°1 (50 km/h sans vent) du cadre 2012 et du cadre Aerostorm (à droite)

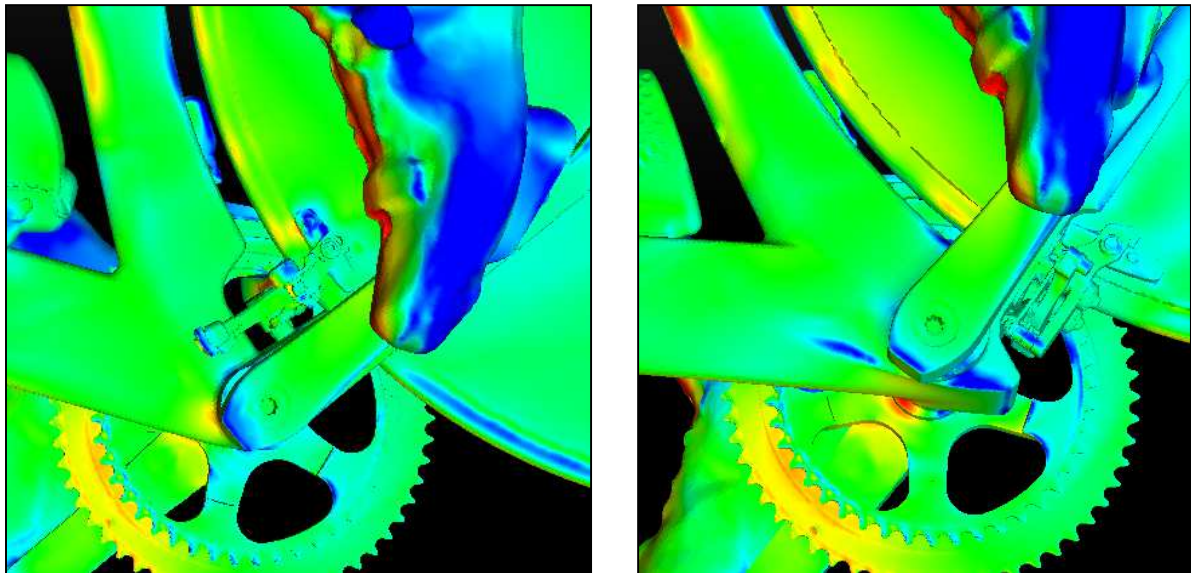


Figure 78 Forces de pression de l'écoulement de l'air exercées au niveau des freins arrière, dans la configuration n°1 (50 km/h sans vent) du cadre 2012 et du cadre Aerostorm (à droite)

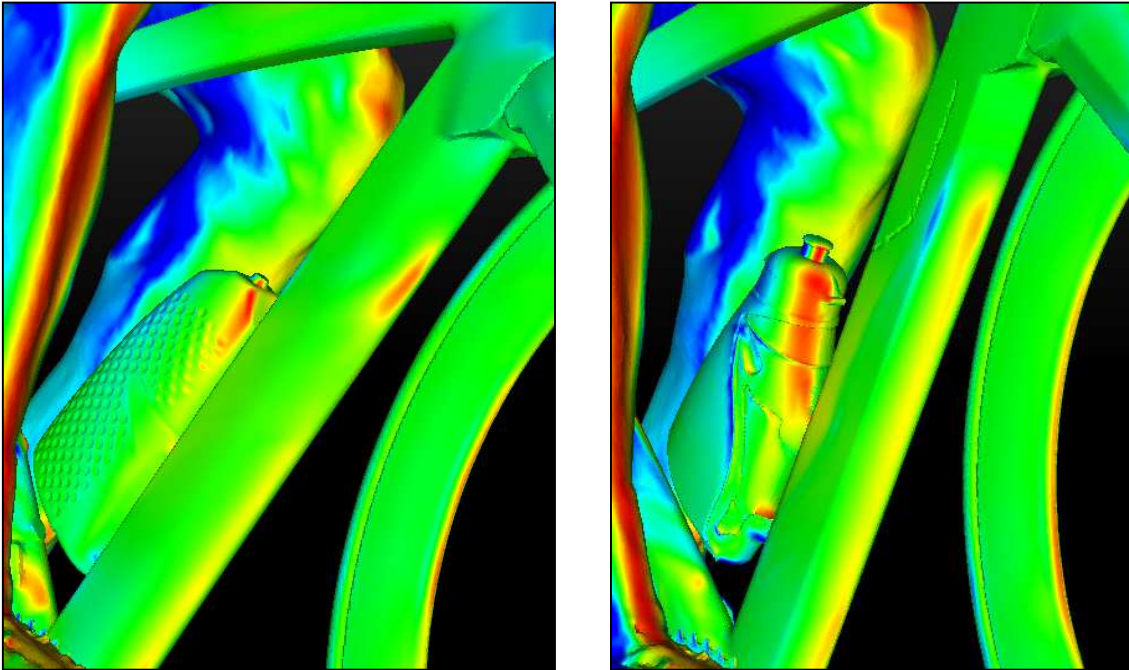


Figure 79 Forces de pression de l'écoulement de l'air exercées au niveau des tubes diagonaux et des bidons dans la configuration n°1 (50 km/h sans vent) du cadre 2012 et du cadre Aerostorm (à droite)

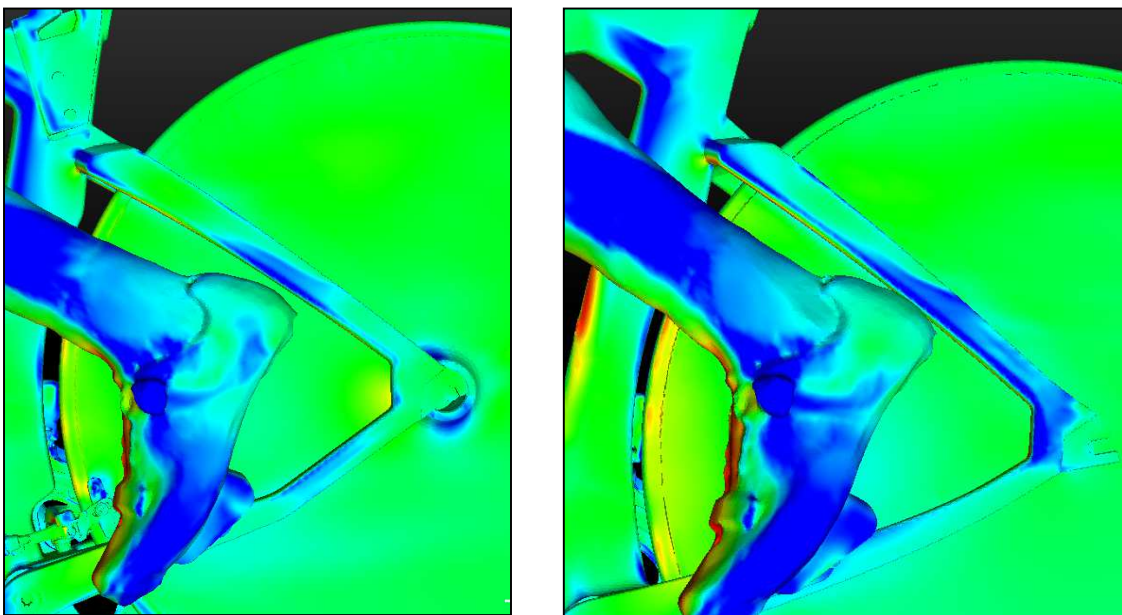


Figure 80 Forces de pression de l'écoulement de l'air exercées au niveau des triangles arrières et des roues arrières dans la configuration n°1 (50 km/h sans vent) du cadre 2012 et du cadre Aerostorm (à droite)

L'étude CFD avec le modèle final du cadre Lapierre Aerostorm montre qu'il permet de diminuer de manière globale la traînée aérodynamique de 18,2 W en moyennant les quatre configurations de calculs CFD, soit 2,8 W de mieux qu'avec le cadre Specialized (figure 81).

Ce cadre permet d'améliorer l'interface entre le vélo et le cycliste puisque comparé au modèle précédent, la traînée générée par le corps du cycliste est diminuée de 9,5 W. Au niveau du vélo, dont la traînée totale est diminuée de 8,7 W, on remarque que les modifications apportées au cadre permettent de diminuer très nettement la traînée générée par les roues (-4,9 W) et les autres composants (-12,0 W), même si la traînée du cadre seul est supérieure à celle du modèle 2012 (+5,7 W).

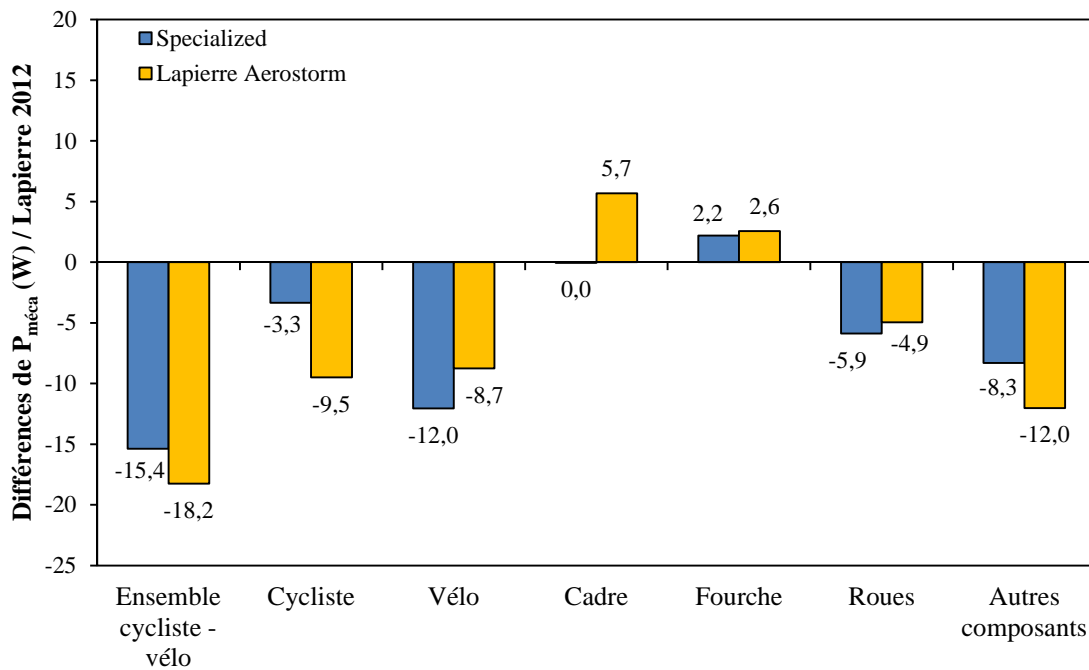


Figure 81 Différences moyennes de $P_{méca}$ due à la traînée aérodynamique des composants du système cycliste - vélo avec les cadres de CLM Specialized et Lapierre Aerostorm en comparaison au Lapierre 2012

Lorsqu'on détaille les résultats dans les différentes configurations d'essais, on s'aperçoit que la traînée aérodynamique avec le cadre Lapierre Aerostorm est significativement plus faible qu'avec l'ancien modèle Lapierre dans les différentes configurations de vent, excepté dans la condition vent de dos, où les écarts entre les différents cadres ne sont pas significatifs (tableau 12).

Tableau 12 Détails des différences de $P_{méca}$ de la traînée aérodynamique des composants du système cycliste - vélo avec les cadres Specialized et Lapierre Aerostorm en comparaison au Lapierre 2012 dans les 4 configurations d'essai

	Composants	Lapierre 2012	Specialized (W)	Lapierre Aerostorm (W)
Config. 1 : Sans vent	Ensemble cycliste - vélo	Réf.	-10,1	-18,9
	Vélo	Réf.	-8,6	-5,4
	Cycliste	Réf.	-1,4	-13,5
	Cadre	Réf.	+0,3	+4,5
	Fourche	Réf.	+1,4	+1,3
	Roues	Réf.	-2,3	-2,3
	Autres composants	Réf.	-8,0	-9,0
Config. 2 : Vent de face	Ensemble cycliste - vélo	Réf.	-28,9	-36,4
	Vélo	Réf.	-18,2	-15,1
	Cycliste	Réf.	-10,7	-21,3
	Cadre	Réf.	+1,8	+9,7
	Fourche	Réf.	+4,1	+3,5
	Roues	Réf.	-6,6	-5,1
	Autres composants	Réf.	-17,5	-23,2
Config. 3 : Vent de dos	Ensemble cycliste - vélo	Réf.	-1,1	+0,3
	Vélo	Réf.	-1,8	-1,1
	Cycliste	Réf.	+0,7	+1,4
	Cadre	Réf.	-0,2	+1,2
	Fourche	Réf.	+0,2	+0,3
	Roues	Réf.	-0,1	-0,4
	Autres composants	Réf.	-1,7	-2,2
Config. 4 : Vent de côté	Ensemble cycliste - vélo	Réf.	-15,4	-18,1
	Vélo	Réf.	-12,0	-13,4
	Cycliste	Réf.	-3,3	-4,6
	Cadre	Réf.	+0,0	+7,2
	Fourche	Réf.	+2,2	+5,1
	Roues	Réf.	-5,9	-12,1
	Autres composants	Réf.	-8,3	-13,7

L'optimisation de l'intégration des composants (freins, bidon, tige de selle et roue arrière) est vérifiée avec le détail de la traînée aérodynamique générée par chacun des éléments du vélo avec vent de face (figure 82) et vent de côté (figure 83). Par exemple, sur la figure 82 présentant les différences de traînée des éléments du vélo, dans la configuration n°2, on

remarque que la traînée du boîtier de pédalier, du tube de selle et de la fourche est augmentée par rapport au modèle 2012. Cela est dû au fait que la modifications de ces éléments du vélo permet de mieux intégrer d'autres composants et de diminuer très nettement leur traînée. En effet, on observe que les freins arrière, la roue arrière et les freins avant ont une traînée significativement plus faible avec l'Aerostorm comparé avec l'ancien modèle. Il convient donc d'analyser l'interface entre les différents éléments du vélo pour comprendre d'où proviennent les principales améliorations obtenues avec le cadre Aerostorm.

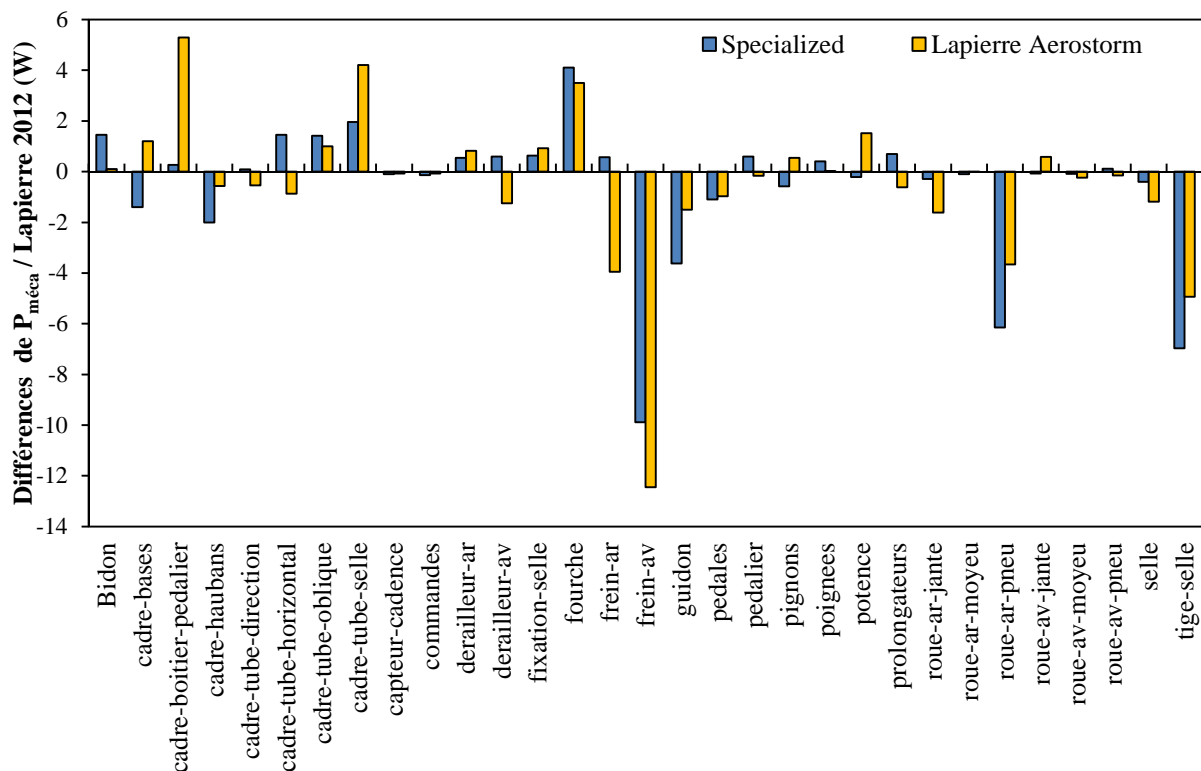


Figure 82 Différences de $P_{méca}$ de la traînée aérodynamique des éléments du vélo Specialized et Lapierre Aerostorm en comparaison au Lapierre 2012 (configuration n°2 : vent de face)

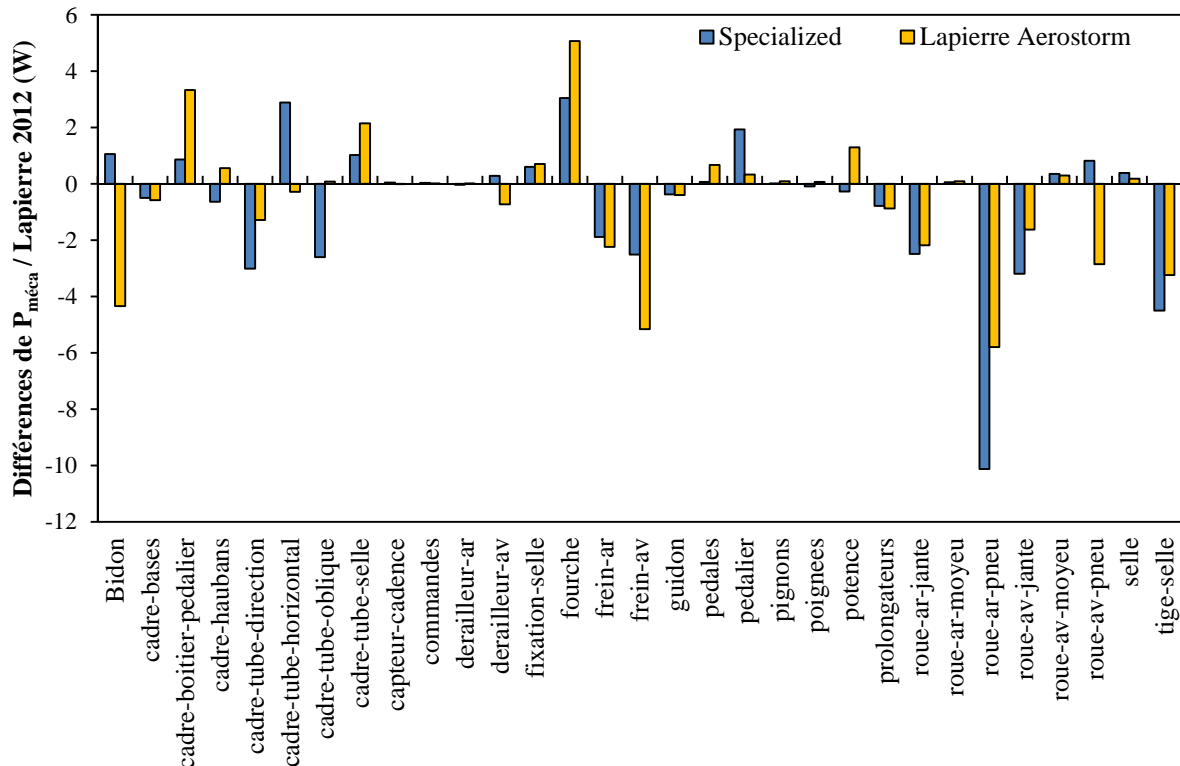


Figure 83 Différences de $P_{méca}$ de la traînée aérodynamique des éléments du vélo Specialized et Lapierre Aerostorm en comparaison au Lapierre 2012 (configuration n°4 : vent de côté)

La visualisation des forces de pression exercées sur les parois du vélo renseigne sur les modifications de l'écoulement de la couche limite suite aux nouvelles propriétés de l'Aerostorm. On distingue très nettement les différences au niveau de la tige de selle (figures 76 et 77), fourche et frein avant (figure 77), boîtier de pédalier et frein arrière (figure 78), tube diagonal et bidon (figure 79), roues et triangles arrière (figure 80).

En ce qui concerne la visualisation des forces de cisaillement sur la paroi du cadre, on remarque, avec la configuration vent de côté (figure 84), que la nouvelle géométrie du tube diagonal, de la tige de selle, des bases arrière et de la fourche permettent d'influencer positivement l'écoulement de la couche limite sur les parois du cadre. En effet, on note d'avantage de zones de frottements importants, ce qui suggère que l'écoulement est plus laminaire le long de ces parois alors que sur le précédent modèle, les décrochages de couche limite intervenaient plus tôt sur les parois et semblaient donc provoquer d'avantage de flux turbulents.

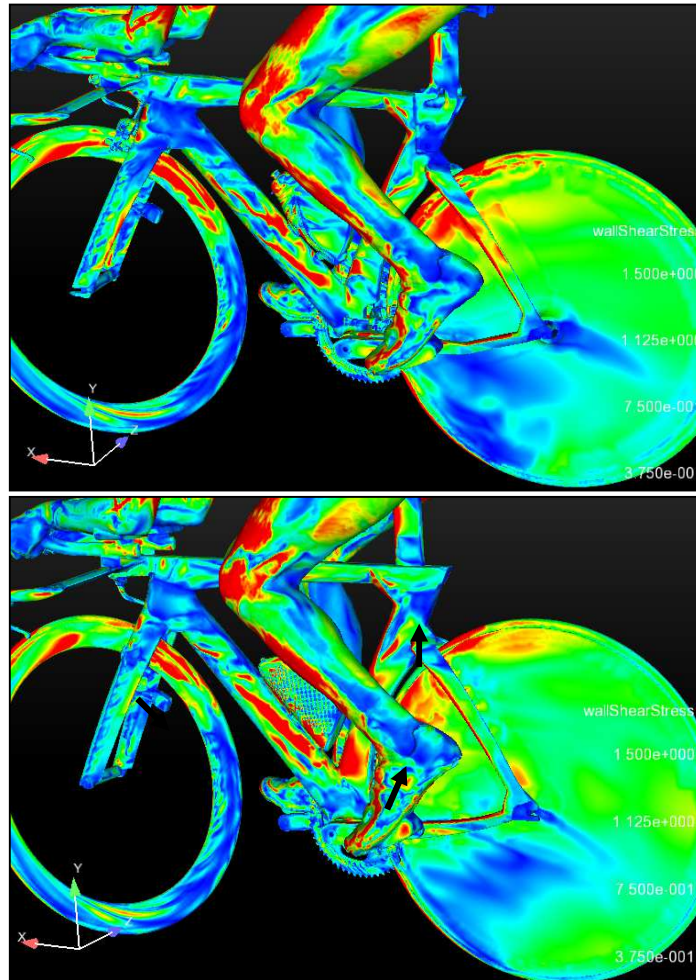


Figure 84 Forces de cisaillement de l'écoulement de l'air exercées au niveau du vélo dans la configuration n°4 (vent de côté) du cadre 2012 et du cadre Aerostorm (en bas)

En conclusion, l'étude CFD a permis de mettre en lumière l'impact sur la traînée aérodynamique des améliorations apportées au cadre de CLM en démontrant ainsi l'importance de la prise en considération des interfaces entre les différents éléments du vélo, mais également entre le vélo et le cycliste, pour optimiser l'aérodynamisme globale du système cycliste - vélo. Ces résultats montrent que le cadre Lapierre Aerostorm permet de diminuer la traînée aérodynamique globale dans les différentes configurations de vent en comparaison aux cadres de CLM Lapierre 2012, Specialized et Trek. Cette méthodologie de modélisation numérique doit à présent être validée en situation expérimentale, en soufflerie et sur vélodrome pour s'assurer de la valeur des résultats obtenus avec la méthode CFD.

5. Validation en soufflerie du cadre Aerostorm 2013 avec mannequin

La validation du cadre Aerostorm en soufflerie a été réalisée en reproduisant le montage des vélos tels qu'ils ont été testés avec la méthode CFD (figure 85). Par rapport au vélo utilisé par les coureurs de l'équipe FDJ, il manque les gaines de câbles des freins avant et arrière, qui ont fait l'objet d'un essai supplémentaire afin de mesurer leur impact sur l'aérodynamisme global (figure 86).



Figure 85 Mannequin posé sur les deux vélos de CLM Lapierre 2012 et Aerostorm



Figure 86 Câbles externes des freins avant (à gauche) et arrière (à droite)

Le tableau 13 présente les conditions expérimentales de validation en soufflerie du vélo de CLM Lapierre Aerostorm.

Tableau 13 Matériels et équipements pour la validation en soufflerie du cadre Aerostorm avec le mannequin

	Essai n°1 : Lapierre 2012 (Référence)	Essai n°2 : Lapierre Aerostorm	Essai n°3 : Lapierre Aerostorm avec gaines
Protocole	n°2	n°2	n°2
Casque	Uvex Race 6	Uvex Race 6	Uvex Race 6
Combinaison	sans	sans	sans
Couvre-chaussures	sans	sans	sans
Cadre	Lapierre CLM 2012	Lapierre Aerostorm	Lapierre Aerostorm
Groupe	Shimano Di2 7900	Shimano Di2 9000	Shimano Di2 9000
Roues	Av : Shimano C50 Ar : Pro Textreme 2012	Av : Shimano C50 Ar : Pro Textreme 2013	Av : Shimano C50 Ar : Pro Textreme 2013
Kit bidon	Elite 2012	Elite 2013	Elite 2013

Résultats

Les résultats des essais en soufflerie montrent qu'en moyenne le nouveau vélo de CLM Aerostorm 2013 est moins performant d'un point de vue aérodynamique avec vent de face de 2 à 3 % (~10 W) comparé au précédent modèle Lapierre (tableau 14). En revanche, avec des vents de côté, il est légèrement plus performant (-1,0%). Ces résultats vont donc à l'encontre de l'étude CFD. En effet, cette dernière quantifiait un gain de $P_{méca}$ moyen de 18 W soit près de 5% pour le nouveau cadre. Manifestement, les mesures dynamiques en soufflerie montrent des résultats sensiblement différents de ceux obtenus avec la méthode CFD. Seuls les résultats obtenus avec les configurations vent de côté important (entre 10 et 20°) semblent aller dans le même sens. Il convient de noter que les résultats obtenus aux angles de 7,5° et 10° indiquent un angle critique de décrochage de l'écoulement qui provoque un phénomène de turbulence instationnaire (figure 87).

Les essais du vélo Aerostorm avec l'ajout des gaines externes des freins avant et arrière, tel qu'il est utilisé en conditions réelles par les cyclistes, ont montré une dégradation de la pénétration dans l'air globale de l'ensemble cycliste - vélo (+1,7%). Ce résultat montre que la préparation des fichiers CAO et du maillage dans la méthodologie de CFD est une étape complexe qu'il convient de parfaitement maîtriser, si l'on souhaite obtenir des résultats en lien avec la réalité. Au moment des essais en CFD, l'ingénieur Lapierre ne savait pas encore comment serait finalisé le montage des freins, et les essais ont ainsi été réalisés en se

concentrant uniquement sur le cadre et l'intégration des composants seuls, sans prendre en compte leur montage.

Tableau 14 Différences relatives de $P_{méca}$ entre les cadres Lapierre 2012 et Aerostorm (sans et avec gaines) selon les conditions de vent

	Angle 0°	Angles 0 à 20°	Moyenne globale
Essai 1 : Lapierre 2012	Réf.	Réf.	Réf.
Essai 2 : Lapierre Aerostorm (CFD)	+2,3%	-1,0%	-0,1%
Essai 3 : Lapierre Aerostorm (avec gaines)	+3,7%	+0,8%	+1,6%

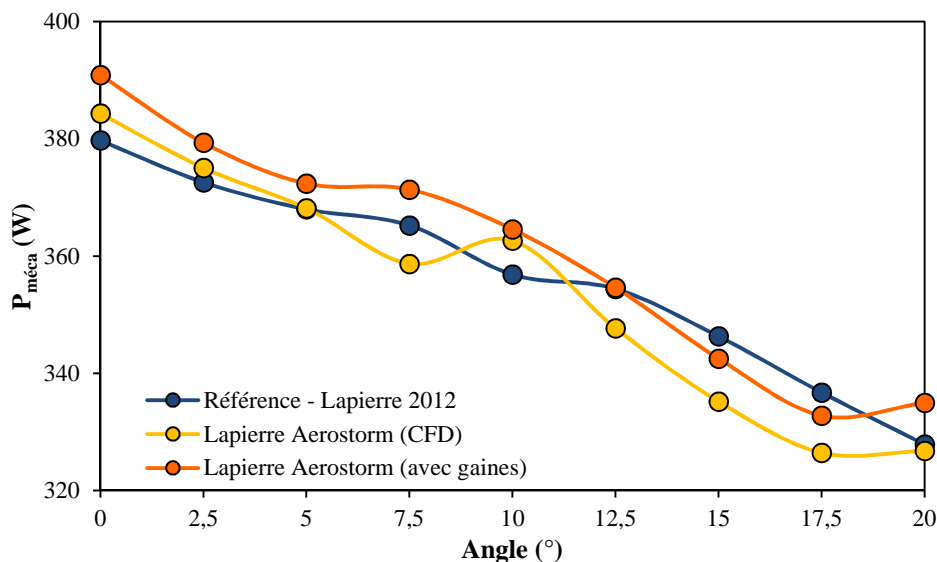


Figure 87 Relations $P_{méca}$ – angle du vent à 50 km/h des cadres de CLM Lapierre 2012 et Aerostorm (sans et avec gaines de freins)

Dans un second temps, la technique de visualisation pariétale de l'écoulement dans la couche limite a été utilisée afin de mieux comprendre les effets de l'air sur le cadre et vérifier si des similitudes étaient trouvées entre cette technique et les visualisations obtenues avec la méthode CFD. Comme expliqué précédemment, cette méthodologie descriptive des frottements de l'écoulement de l'air sur le cadre permet de visualiser les lignes de frottement et de décollement s'opérant dans la couche limite (figure 88).



Figure 88 Lignes de frottement mises en évidence au niveau du tube diagonal, du tube de direction, du tube de selle, de la fourche et des haubans arrières

De fortes similitudes ont ainsi été retrouvées entre les images issues de la CFD, notamment des forces de cisaillement, et les lignes de frottement de l'écoulement de l'air. En effet, comme on l'observe sur la figure 88, les lignes de frottement mises en valeur par cette technique de visualisation pariétale au niveau du tube diagonal, du tube de direction, du tube de selle, de la fourche et des haubans arrières correspondent aux zones où les forces de cisaillement étaient élevées sur les fichiers de visualisation issues de la CFD.

Cependant, l'interprétation des lignes de frottement et de décollement reste complexe et certains écoulements ne semblent pas être efficaces, notamment au niveau du tube diagonal, du tube de selle et du tube de direction. Par exemple, la figure 89 montre un phénomène tourbillonnaire provoquée par la gaine externe des freins avant.

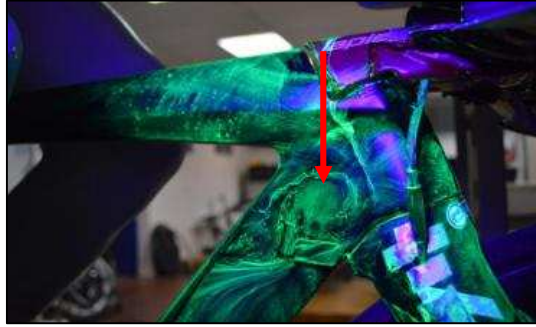



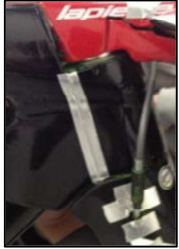


Figure 89 Phénomène tourbillonnaire provoquée par la gaine de freins sur le tube de direction

C'est pourquoi des essais de modifications de la surface du cadre ont été réalisés dans le but d'influencer l'écoulement de la couche limite autour des différents tubes. Le tableau 15 présente l'ensemble des essais qui ont été réalisés pour tenter d'optimiser la pénétration dans l'air du cadre Aerostorm en ajoutant des aspérités sur le cadre ou modifiant certaines parties avec de la plasticine.

Aucun de tous ces essais n'a apporté de gains significatifs dans la pénétration dans l'air du système cycliste - vélo. Ces résultats suggèrent que la surface du cadre a une influence très faible au regard de la géométrie des tubes.

L'ensemble des résultats et observations ont remis en question le processus de développement de l'Aerostorm 2013 avec la méthode CFD. Il convenait de savoir à quel niveau pouvait exister les erreurs potentielles expliquant cette discordance des résultats.

Tableau 15 Détails des essais de modifications de la surface du cadre avec les différences de traînée aérodynamique en comparaison à la configuration de référence (cadre nu)

Session	Matière utilisée	Endroits / positions	Illustrations	Δ (%) / référence
1	Plasticine	Fourche + freins avants		+0,4%
2-6	Fil de pêche 0,7 mm	5 positions sur le tube de direction		+0,0%
7-10	Fil acier 0,7 mm et fil de pêche 0,7 mm	2 positions sur tube diagonal		+0,2%
11	Plasticine	Arrête du tube diagonal derrière la fourche		+0,7%
12	Fil de pêche 0,7 mm	Tube de selle		+0,1%

Suite à cette première étude de validation, la société ACE, réalisatrice de l'étude CFD, s'est donc chargée de réaliser des études en interne afin de comprendre et pouvoir expliquer les écarts entre le modèle dynamique de la soufflerie et le modèle numérique de la CFD. Deux mois après cette session, le responsable d'ACE a présenté ses conclusions, lors d'une réunion avec Lapierre et le département R&D de l'équipe FDJ. Une nouvelle étude CFD avec une méthodologie de calcul plus puissante (méthode de turbulence instationnaire) a confirmé les résultats obtenus avec la première étude CFD. Cela suggérait que les erreurs intervenaient davantage dans l'évaluation dynamique en soufflerie. De nouveaux essais en soufflerie ont ainsi permis de mettre en évidence un biais méthodologique issu de l'utilisation du mannequin. En effet, les roues utilisées pour établir la validation du cadre Aerostorm

différentes et n'étaient pas parfaitement équilibrées, ce qui provoquait des niveaux de vibrations relativement importants du fait de la rigidité de l'ensemble mannequin – vélo. Ces vibrations provoquées par le nouveau modèle de roues lenticulaires Pro (problème à la construction) étaient responsables de la création de turbulences avec le cadre Aerostorm. Il convient de souligner que ce phénomène de vibrations due à un mauvais équilibrage des roues n'est pas observable avec un cycliste qui les amortit car il ne constitue pas un système rigide comme le mannequin. Cela suggère que le système de mesure de la soufflerie atteint ses limites en fonction de l'équilibrage des roues, l'état des roulements des moyeux ou le collage des boyaux sur la jante puisque ces paramètres influencent directement les mesures réalisées.

Par conséquent, la session suivante d'essais sur vélodrome en conditions réelles de locomotion apparaissait nécessaire pour compléter ces essais et valider le processus de développement du cadre Aerostorm.

6. Validation du cadre de CLM Aerostorm sur vélodrome

En raison du manque de disponibilités des coureurs pendant la saison compétitive, cette session de validation sur vélodrome a été réalisée plusieurs mois après la réunion avec ACE et Lapiere. L'objectif de cette session a été de comparer en conditions réelles de locomotion les cadres Lapiere CLM 2012, Lapiere Aerostorm et Specialized (figure 90) afin d'évaluer la traînée aérodynamique globale du système cycliste - vélo avec des trois cadres.

Positions et matériels testés

Le tableau 16 présente les conditions expérimentales des tests de validation du vélo de CLM Lapiere Aerostorm en conditions réelles sur vélodrome.

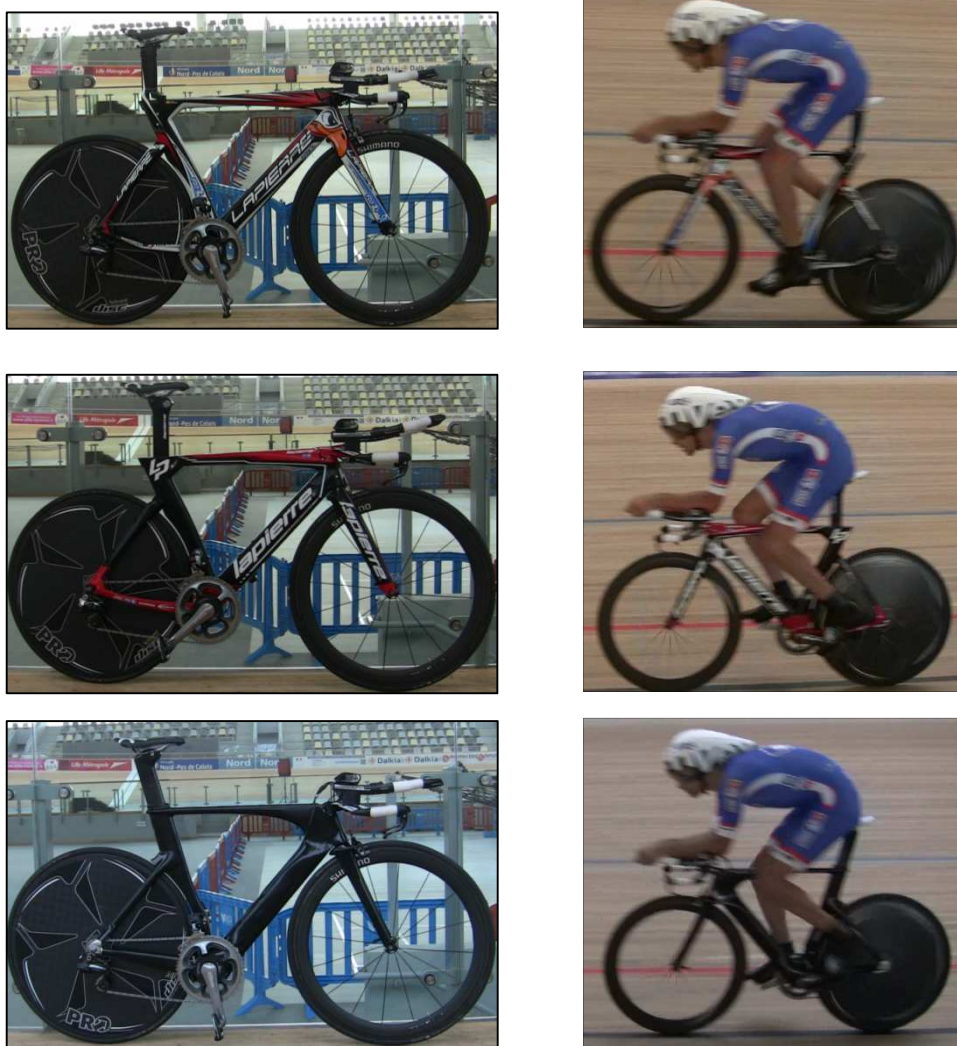


Figure 90 Cadres utilisés pour les essais de validation sur vélodrome avec position identique de JR sur les trois vélos : Lapiere CLM 2012 (en haut), Lapiere Aerostorm (au milieu) et Specialized (en bas)

Tableau 16 Matériels et équipements de JR pour les essais de validation du cadre Lapierre Aerostorm

	Essai n°1 : Aerostorm 2012 (Référence)	Essai n°2 : Aerostorm 2013	Essai n°3 : Specialized
Position	CLM	CLM	CLM
Casque	Uvex Race 6	Uvex Race 6	Uvex Race 6
Combinaison	B'twin 2013	B'twin 2013	B'twin 2013
Couvre-chaussures	Moa CLM	Moa CLM	Moa CLM
Cadre	Lapierre CLM 2012	Lapierre Aerostorm	Specialized SHIV
Groupe	Shimano Di2 7900	Shimano Di2 7900	Shimano Di2 7900
Roues	Av : Shimano C50 Ar : Pro Textreme	Av : Shimano C50 Ar : Pro Textreme	Av : Shimano C75 Ar : Pro Textreme
Kit bidon	aucun	aucun	aucun

Résultats

Le résultat principal de cette session sur vélodrome montre que le cadre Lapierre Aerostorm était significativement plus performant que l'ancien cadre Lapierre CLM (-2,1% en moyenne) (tableau 17 et figure 91). Il n'existait pas de différence significative entre le Specialized et le cadre Lapierre Aerostorm puisque les très légers écarts de $P_{méca}$ en faveur du Specialized étaient compris entre 0,1 et 0,6%.

Tableau 17 Différences relatives de $P_{méca}$ avec les cadres Lapierre Aerostorm et Specialized par rapport au cadre de référence Lapierre 2012

	Lapierre Aerostorm	Specialized
40 km/h	-3,6%	-3,7%
45 km/h	-2,1%	-2,5%
50 km/h	-0,8%	-1,4%

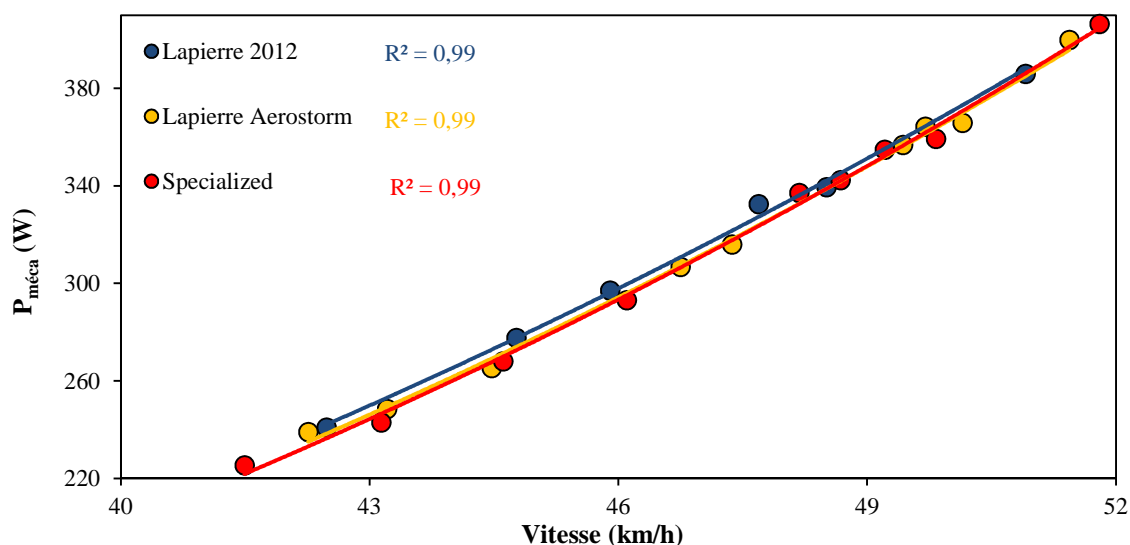


Figure 91 Relations $P_{méca}$ – vitesse de JR sur vélodrome avec les 3 vélos

Ces tests nous permettent donc d'affirmer que le nouveau cadre Lapierre Aerostorm est plus performant que l'ancien modèle Lapierre et qu'il est très proche du Specialized SHIV d'un point de vue aérodynamique. Ces résultats se rapprochent de ceux obtenus lors de l'étude comparative en soufflerie avec le mannequin où une différence moyenne avec les vents de face de 1,6% avait été trouvée entre le Specialized et le Lapierre CLM 2012. Ces résultats vont également dans le sens d'une meilleure traînée aérodynamique totale obtenue avec le nouveau cadre Aerostorm comparé au précédent modèle Lapierre, comme l'étude CFD l'avait mis en évidence. Cependant, les différences avec le Specialized ne sont pas significatives et il n'est pas possible de conclure sur le fait que le cadre Aerostorm est plus performant. Il convient également de souligner que ces résultats sont à relativiser à l'égard des résultats de CFD puisque les tests sur vélodrome ne permettent pas de reproduire des essais avec un vent latéral ou une condition de vent apparent supérieur à 50 km/h. De plus, ces essais ont été réalisés par JR, qui a une position et une morphologie différente de celle du coureur utilisée pour les essais avec CFD et en soufflerie avec le mannequin, ce qui influence directement sur la traînée induite par les composants du vélo sur le corps du cycliste. Une prochaine session en soufflerie devrait permettre de réaliser de nouveaux essais entre les différents cadres Lapierre.

7. Nouvel essai de validation en soufflerie du cadre Lapierre Aerostorm

Positions et matériels testés

Etant donné la complexité de reproduire les mêmes conditions expérimentales en soufflerie qu'en CFD tout en ayant une bonne validité des mesures, il a été décidé de réaliser de nouveaux essais en soufflerie avec les vélos de CLM Lapierre 2012 et Aerostorm tels qu'ils sont utilisés par les cyclistes. Ces essais se rapprochaient donc de ceux réalisés sur le vélodrome, avec notamment les gaines externes de freins avant et arrière. Comme la précédente session en soufflerie a montré que le système de mesure pouvait atteindre ses limites en fonction de l'équilibrage des roues, l'état des roulements des moyeux ou le collage des boyaux sur la jante, la même paire de roues a été utilisée avec les deux cadres, à la différence de la CFD.

Le tableau 18 présente les conditions expérimentales de la nouvelle comparaison en soufflerie des vélos de CLM Lapierre 2012 et Aerostorm avec le mannequin.

Tableau 18 Matériels et équipements pour la validation en soufflerie (2^{ème} essai) du cadre Aerostorm avec le mannequin

	Essai n°1 : Lapierre 2012 (Référence)	Essai n°2 : Lapierre Aerostorm
Protocole	n°2	n°2
Casque	Uvex Race 6	Uvex Race 6
Combinaison	sans	sans
Couvre-chaussures	sans	sans
Cadre	Lapierre CLM 2012	Lapierre Aerostorm
Groupe	Shimano Di2 7900	Shimano Di2 9000
Roues	Av : Shimano C50 Ar : Pro Textreme 2012	Av : Shimano C50 Ar : Pro Textreme 2012
Kit bidon	Elite 2012	Elite 2013

Résultats

Les résultats présentés dans le tableau 19 montrent qu'il n'existait pas de différence significative entre les deux vélos de CLM Lapierre 2012 et Aerostorm. En effet, les différences dans les différentes conditions de vent étaient inférieures à $\pm 0,5\%$. La figure 92 montre qu'avec les différents angles de vent apparent compris entre 0 et 20° à 50 km/h, les

$P_{méca}$ étaient très proches et aucun des deux cadres ne permettait de diminuer systématiquement la traînée avec des vents de côté.

Tableau 19 Différences relatives de $P_{méca}$ entre les cadres Lapierre 2012 et Aerostorm selon les conditions de vent

	Angle 0°	Angles 0 à 20°	Moyenne globale
Essai 1 : Lapierre 2012	Réf.	Réf.	Réf.
Essai 2 : Lapierre Aerostorm	+0,4%	-0,1%	+0,1%

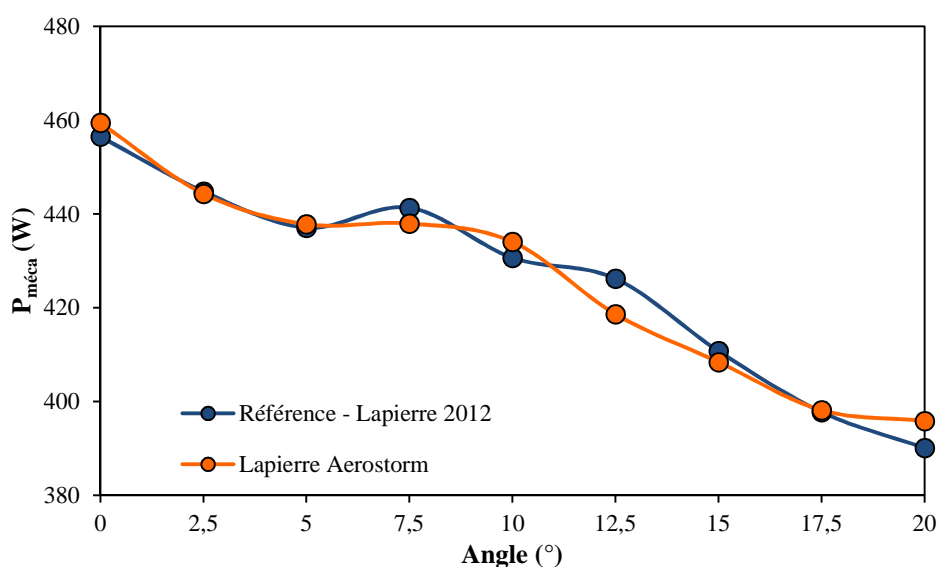


Figure 92 Relations $P_{méca}$ – angle du vent à 50 km/h des cadres CLM Lapierre 2012 et Aerostorm

Par conséquent, ces essais en soufflerie n'allaient pas dans le même sens que les résultats obtenus sur vélodrome. Plusieurs différences majeures dans les conditions expérimentales peuvent expliquer cela, notamment puisqu'en soufflerie le vélo et le mannequin restent parfaitement immobiles. Ces résultats ont l'intérêt de montrer que les différences sont minimales entre les cadres. L'évaluation de l'impact d'un cadre sur la traînée est une procédure complexe en fonction des méthodes qui sont utilisées. C'est pourquoi, l'association des trois méthodologies (CFD, vélodrome et soufflerie), possédant chacune leurs avantages et leurs limites, semble être la meilleure alternative pour obtenir une vision globale du développement d'un cadre sur le plan aérodynamique.

8. Validation du kit bidon – porte bidon de CLM Elite

Positions et matériels testés

Les essais ont porté sur la validation d'un kit bidon – porte-bidon prototype de CLM produit par Elite. Ce kit a été pris en considération dans l'étude CFD du cadre Aerostorm, qui a montré que la géométrie du tube diagonal sous forme kamm-tail permettait d'améliorer la traînée de l'interface avec le kit bidon (figures 82 et 83). L'étude comparative mise en place en soufflerie a porté sur le kit bidon utilisé en 2012 et le kit bidon prototype 2013 avec le nouveau cadre Aerostorm, en référence à la condition cadre nu (figure 93). Pour information, de précédents essais avait montré qu'un kit bidon standard, comme celui utilisé sur les vélos de course en ligne, dégradait la traînée aérodynamique totale de 1,3%.

Le tableau 20 présente les conditions expérimentales des essais de kit bidon – porte bidon de CLM en soufflerie avec le mannequin.

Tableau 20 Matériels et équipements pour la validation en soufflerie du kit bidon – porte-bidon Elite avec le mannequin

	Essai n°1 : sans kit	Essai n°2 : Kit bidon Elite 2012	Essai n°3 : kit bidon proto Elite
Protocole	n°2	n°2	n°2
Casque	Uvex Race 6	Uvex Race 6	Uvex Race 6
Combinaison	sans	sans	sans
Couvre-chaussures	sans	sans	sans
Cadre	Lapierre Aerostorm	Lapierre Aerostorm	Lapierre Aerostorm
Groupe	Shimano Di2 9000	Shimano Di2 9000	Shimano Di2 9000
Roues	Av : Shimano C50 Ar : Pro Textreme	Av : Shimano C50 Ar : Pro Textreme	Av : Shimano C50 Ar : Pro Textreme
Kit bidon	sans	Elite 2012	Proto Elite 2013



Figure 93 Conditions testées : sans kit bidon, kit Elite 2012 et proto Elite 2013

Résultats

Les résultats présentés dans le tableau 21 montrent que le kit bidon prototype Elite est meilleur d'un point de vue aérodynamique (-0,8%) comparé au kit bidon Elite de CLM utilisé précédemment. L'interface du bidon avec le tube diagonal sous forme kamm-tail permet de limiter la dégradation aérodynamique de la traînée avec les vents de côté puisque dans ces conditions la différence par rapport au cadre nu n'est que de +0,4% alors qu'elle est de +1,3% avec l'ancien kit utilisé en 2012.

Tableau 21 Différences relatives de $P_{méca}$ entre les différentes conditions de kit bidon selon les conditions de vent

	Angle 0°	Angles 0 à 20°	Moyenne globale
Essai 1 : Sans kit bidon	Réf.	Réf.	Réf.
Essai 2 : Kit bidon Elite 2012	+0,8%	+1,3%	+1,2%
Essai 3 : Kit bidon proto Elite 2013	+0,5%	+0,4%	+0,4%

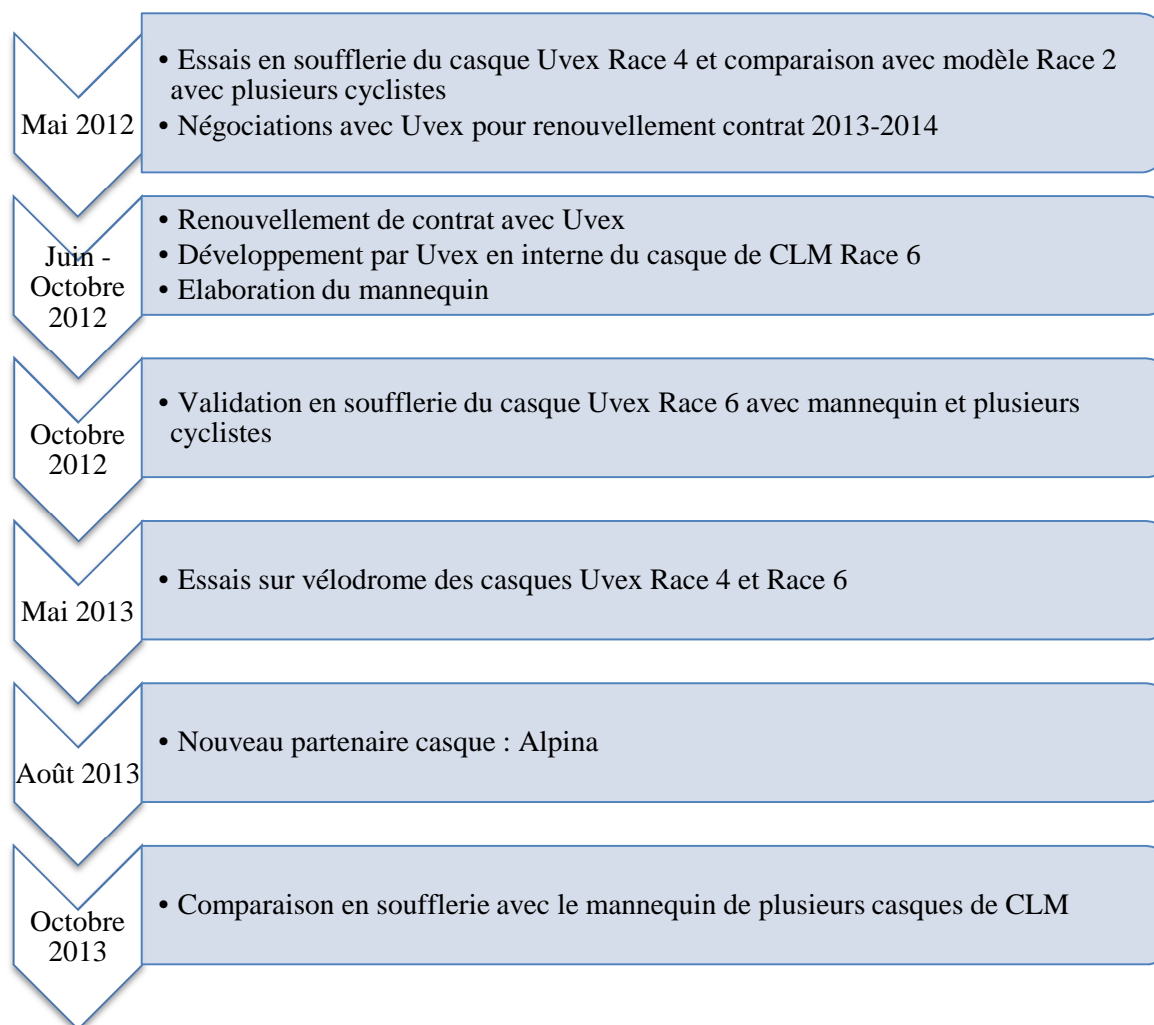
Ces résultats confirment donc une meilleure pénétration dans l'air obtenue conjointement avec le cadre Lapierre Aerostorm et le kit bidon Elite prototype 2013.

9. Conclusion

Cette première étude sur le développement d'un cadre de CLM Lapiere montre la difficulté d'appréhender et d'évaluer les propriétés aérodynamiques d'un cadre de CLM, quelle que soit la méthodologie employée. Que ce soit en soufflerie, en CFD ou sur vélodrome, chaque méthode possède ses propres limites et biais méthodologiques possibles. De ce fait, la complémentarité entre les différentes techniques d'évaluation de la traînée aérodynamique est indispensable pour avoir une vision globale du nouveau cadre de CLM Lapiere Aerostorm. Les résultats obtenus à travers les différents essais ont montré que mis à part en CFD, où la $P_{méca}$ estimée ne correspond qu'à la $P_{méca}$ des résistances aérodynamiques, les différences de $P_{méca}$ totales étaient toujours inférieures à 2,5 % de manière globale entre les différents cadres testés. D'après la CFD et les essais en conditions réelles sur vélodrome, le nouveau cadre de CLM Aerostorm serait significativement plus performant que l'ancien cadre Lapiere. Comparé au cadre Specialized qui a servi de niveau de référence à atteindre au cours de cette étude, les essais sur vélodrome ont montré qu'il n'y avait pas de différence significative avec le nouveau modèle Aerostorm. En revanche, la session finale en soufflerie n'a pas confirmé ces résultats puisqu'avec le mannequin, il n'existait pas de différence significative entre l'ancien et le nouveau cadre Lapiere. Au final, nous pouvons affirmer que le nouveau cadre de CLM Lapiere Aerostorm n'est pas moins performant d'un point de vue aérodynamique que son prédécesseur. Au contraire, il apparaît que l'Aerostorm permet de diminuer significativement la traînée comme deux méthodes sur trois l'ont montré.

Suite à cette étude, il semble que la méthodologie des essais en conditions réelles sur vélodrome avec la mesure directe de la $P_{méca}$ soit la méthode la plus fiable pour comparer l'aérodynamisme entre différents cadres. En effet, les essais sur vélodrome apportent de nombreux avantages que ce soit au niveau du vélo (présence des gaines externes, rotation des roues, oscillation du vélo lors du pédalage...) ou du coureur (pédalage en conditions réelles, mouvements des membres inférieurs et supérieurs...). En revanche, les conditions expérimentales en CFD ou en soufflerie différant davantage de la réalité, ces méthodologies apparaissent plus appropriées dans les phases de développement du cadre et pour l'intégration de certains composants. Il semble que les biais en soufflerie apparaissent à partir du moment où il soit nécessaire de démonter et remonter le système mannequin - vélo sur le banc de mesure.

CHAPITRE 3 : Etude aérodynamique de casques de CLM



1. Essais du casque de CLM Uvex Race 4

Le travail de collaboration avec la société « partenaire - casque » Uvex a débuté par des essais en soufflerie avec le casque de CLM Race 4 fourni en mai 2012. Ce casque a été conçu à la demande de l'équipe FDJ, suite aux nouveaux casques des marques concurrentes arrivés dans les pelotons lors de la saison 2011. La tendance se portait plus vers des casques plus courts avec une forme globale plus arrondie et une visière intégrée.

Des essais antérieurs réalisés au sein de l'équipe FDJ en soufflerie avaient montré que l'aérodynamisme d'un casque de CLM était dépendant de la morphologie et de la position du cycliste sur son vélo. En effet, suivant la forme et l'inclinaison de la tête ainsi que de la

morphologie de la nuque et du dos, la traînée induite par un casque diffèrait et expliquait pourquoi un casque pouvait être plus ou moins performant d'un point de vue aérodynamique selon les coureurs.

Le casque de CLM utilisé exclusivement par les cyclistes de l'équipe FDJ jusqu'en 2012 était le modèle Race 2 développé en 2004. Avec les avancées des sociétés concurrentes et les nouvelles connaissances acquises en terme d'aérodynamisme, un travail de développement sur un nouveau casque de CLM semblait nécessaire.

La première étape dans ce processus de développement a consisté à comparé les casques Uvex Race 2 et Race 4 avec certains cyclistes de notre équipe (figure 94).

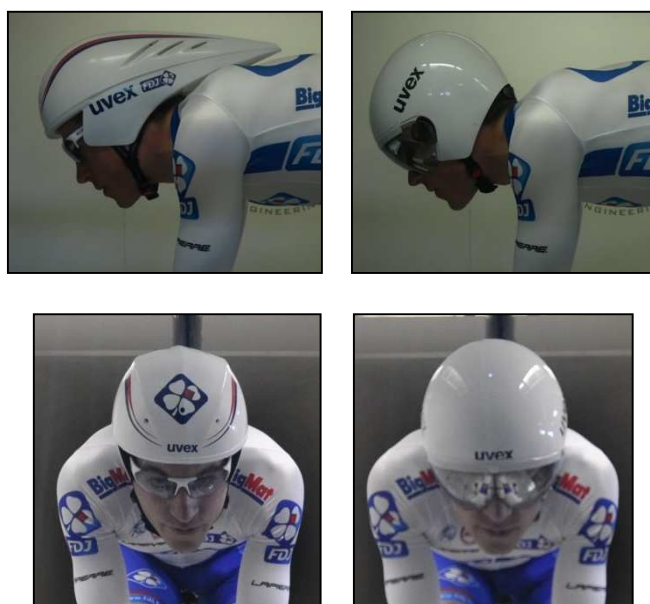


Figure 94 Casques Uvex Race 2 (à gauche) et Race 4 (à droite)

Positions et matériels testés

Le tableau 22 présente les conditions expérimentales des essais de casques avec des cyclistes de l'équipe FDJ en soufflerie.

Tableau 22 Matériels et équipements des cyclistes pour les essais du casque Race 4 en soufflerie

	Test n°1 : AJ	Test n°2 : TP	Test n°3 : JR
Protocole	n°1	n°1	n°2
Position	CLM	CLM	CLM
Casque	Uvex Race 2 / Uvex Race 4	Uvex Race 2 / Uvex Race 4	Uvex Race 2 / Uvex Race 4
Combinaison	Moa ML 2011	Moa ML 2011	Moa MC 2012
Couvre-chaussures	MOA CLM	MOA CLM	MOA CLM
Cadre	Lapierre Aerostorm 2011	Lapierre Aerostorm 2011	Lapierre Aerostorm 2011
Groupe	Shimano Di2 7900	Shimano Di2 7900	Shimano Di2 7900
Roues	Av : Shimano C50 Ar : Pro Textreme	Av : Shimano C50 Ar : Pro Textreme	Av : Shimano C50 Ar : Pro Textreme
Kit bidon	aucun	aucun	aucun

Résultats

Les figures 95 à 98 montrent les $P_{méca}$ estimées pour chaque angle et vitesse du vent selon le casque (en bleu : Race 2 et en vert : Race 4). Comme attendu, les résultats sont divergents selon les cyclistes. Pour AJ et TP, le casque Race 4 est nettement moins performant d'un point de vue aérodynamique puisqu'en global les pertes de $P_{méca}$ pour une même condition sont estimées à respectivement 3,7% et 5,4%, ce qui équivaut à des pertes chronométriques de 1 sec/km et 1,5 sec/km pour une même $P_{méca}$. Cependant, il convient de noter que pour ces deux coureurs, avec la condition vent de 50 km/h - angle 10°, le casque Race 4 est légèrement plus performant, respectivement de 2,4% et 0,5%. Il semble donc que la forme arrondie à l'arrière du casque favorise l'écoulement de l'air avec un angle de vent apparent important. En ce qui concerne JR, le casque Race 4 lui apporte un gain aérodynamique global très significatif de 6,0%, soit 1,8 sec/km.

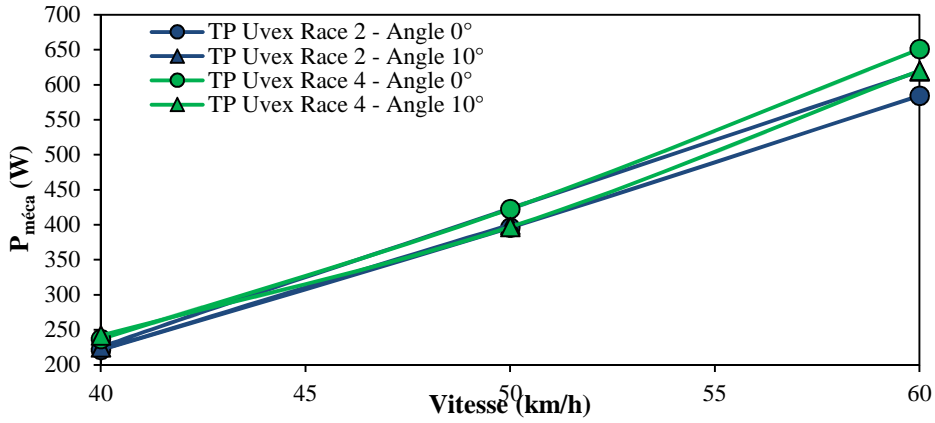


Figure 95 Relations $P_{méca}$ – vitesse de TP avec les casques Uvex Race 2 et Race 4

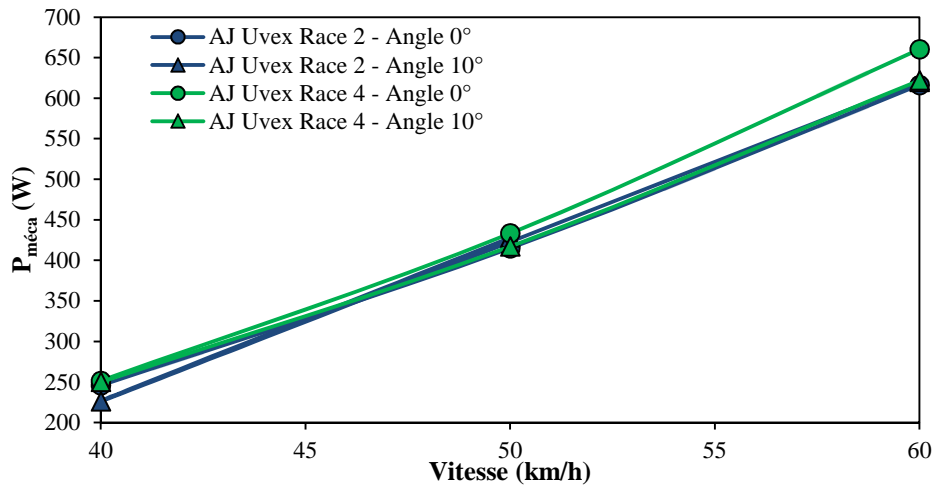


Figure 96 Relations $P_{méca}$ – vitesse de AJ avec les casques Uvex Race 2 et Race 4

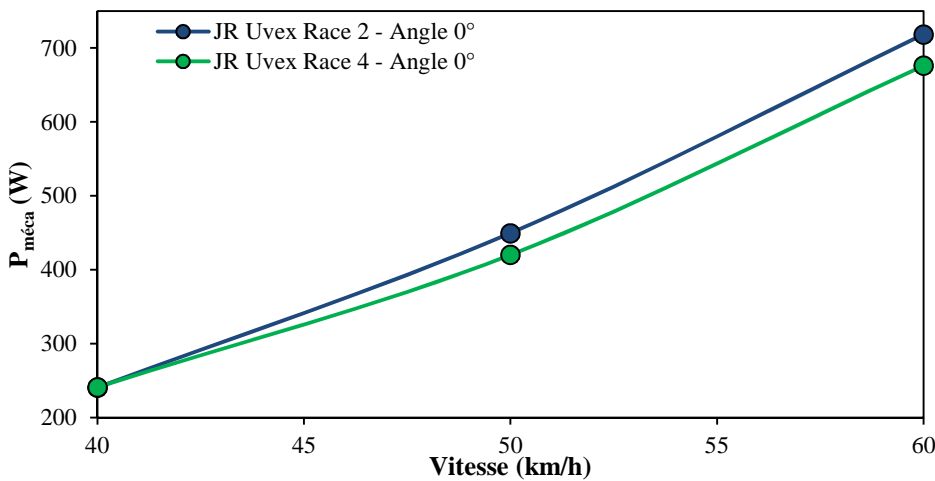


Figure 97 Relations $P_{méca}$ – vitesse de JR avec un vent d'angle de 0° avec les casques Uvex Race 2 et Race 4

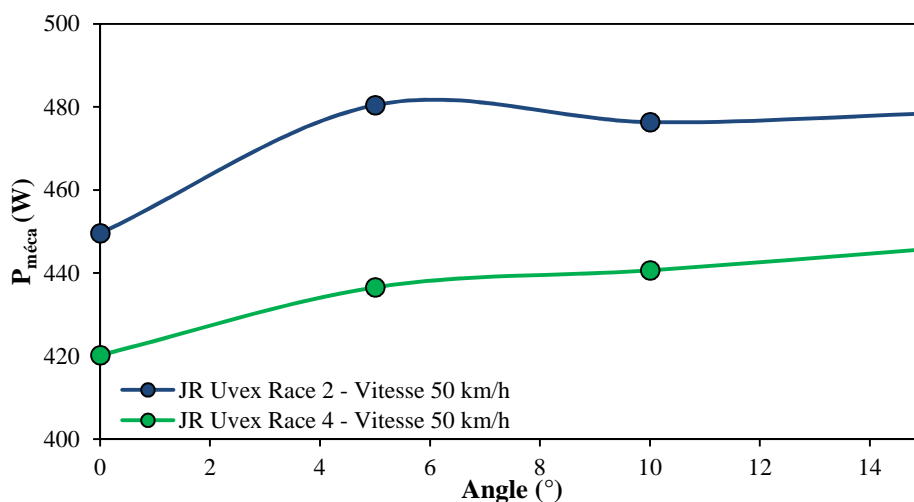


Figure 98 Relations $P_{méca}$ – angle de vent de JR avec une vitesse de 50 km/h avec les casques Uvex Race 2 et Race 4

Suite à ces essais, un compte rendu des résultats a été transmis à la société Uvex avec quelques suggestions de pistes de réflexion. En effet, comme évoqué précédemment, il est établi que l'effet d'un casque est dépendant de la position et de la morphologie du coureur. Pour TP et AJ, le casque Race 4 ne paraissait pas être une bonne solution. On imagine aisément sur la vue de profil de la figure 99, les turbulences qui peuvent se créer derrière le casque.



Figure 99 Vue de profil de TP avec casque Race 4

De plus, il convient de noter que le casque Race 4 est plus volumineux au niveau de la tête : 5 cm plus haut et 4 cm plus large que le Race 2 (figure 100).



Figure 100 Superposition de la forme du casque Race 4 (en rouge) sur AJ

Des essais supplémentaires en fixant la visière du casque Race 4 sur le casque Race 2 ont montré des gains aérodynamiques supérieurs à 2% (figure 101). Ainsi, comme démontré précédemment par Chabroux V. *et al.* (2008), l'ajout d'une visière intégrée améliore l'aérodynamisme de l'interface homme – machine puisque l'écoulement du flux d'air est amélioré au niveau du casque et évite ainsi les turbulences au niveau des espaces vides du front et des oreilles.

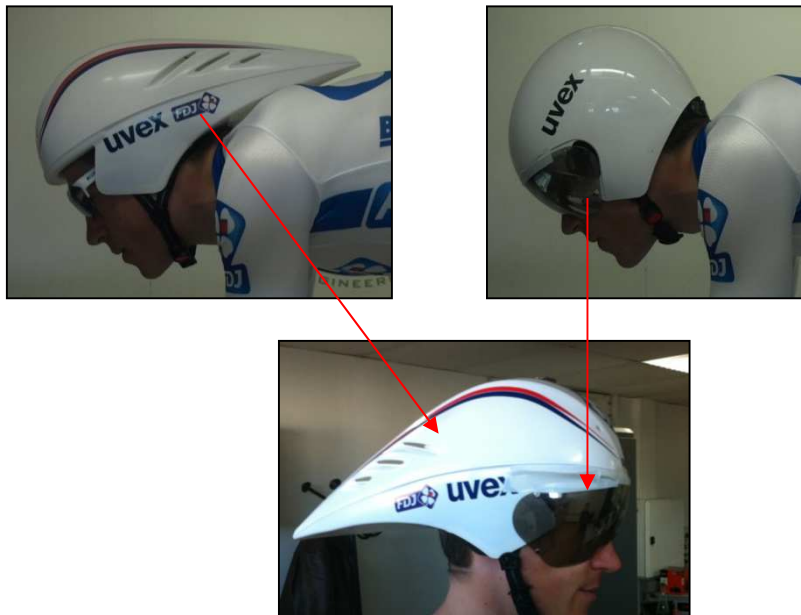


Figure 101 Ajout de la visière du casque Race 4 sur le casque Race 2

Ainsi, pour ces deux coureurs, des casques de marques concurrentes sembleraient mieux épouser la morphologie de l'ensemble tête – nuque – dos (figure 102).

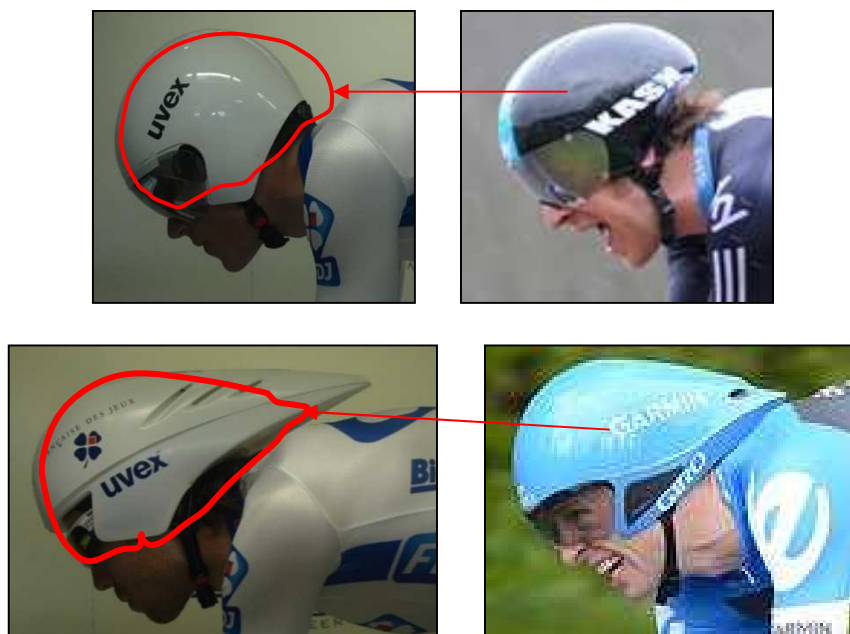


Figure 102 Superposition de la forme de casques de marques concurrentes sur AJ et TP

Malheureusement pour diverses raisons (disponibilités des coureurs, de la soufflerie et des casques), il n'a pas été possible d'organiser une seconde session de soufflerie pour réaliser des essais avec ces casques de marques concurrentes.

L'approbation d'Uvex en réponse à notre compte-rendu ainsi que sur notre volonté de travailler en collaboration avec eux sur le développement d'un casque de CLM a été essentiel dans le renouvellement du contrat de partenariat bi-annuel.

2. Validation du casque de CLM Uvex Race 6

Suite à notre compte-rendu, les ingénieurs Uvex ont travaillé sur le développement d'un nouveau casque de CLM avec une étude CFD et des essais en soufflerie. Malheureusement, nous ne sommes intervenus dans ce projet R&D uniquement dans la partie finale de validation du casque. Ils nous ont brièvement exposé leur étude CFD qui confrontait trois casques différents et dont la version finale a été validée suite à des essais en soufflerie au sein d'une université allemande. Le casque Race 6 est donc ressorti comme étant le casque le plus performant d'un point de vue aérodynamique suite à leur étude interne de développement. Chaque caractéristique de ce casque a été étudiée et répond à une exigence précise : longueur de la queue, visière, aérations (entrée et sortie d'air), nervures en surface...

Afin de valider ce nouveau casque, une session d'essais en soufflerie a été mise en place dans un premier temps afin de vérifier si le casque Race 6 était plus aérodynamique sur nos cyclistes comparé aux précédents casques (figure 103). Dans un second temps, une session sur vélodrome a été organisée avec un coureur afin de vérifier que les résultats obtenus étaient identiques qu'en soufflerie.

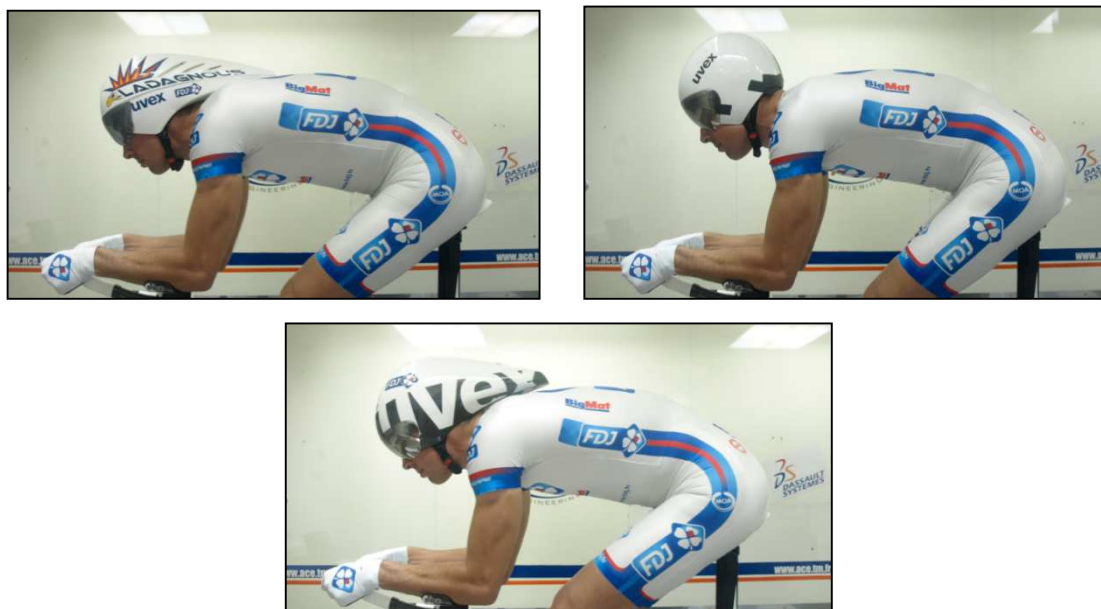


Figure 103 Vues de profil de ML avec les casques Uvex Race 2 (en haut à gauche), Race 4 (en haut à droite) et Race 6 (en bas)

2.1. Essais en soufflerie

Positions et matériels testés

Le tableau 23 présente les conditions expérimentales des essais de validation en soufflerie du casque Uvex Race 6.

Tableau 23 Matériels et équipements des cyclistes pour les essais de validation du casque Race 6 en soufflerie

	Test n°1 : JR	Test n°2 : ML	Test n°3 : Mannequin
Protocole	n°2	n°2	n°2
Position	CLM	CLM	CLM
Casque	Uvex Race 4 / Uvex Race 6	Uvex Race 2 / Uvex Race 4 / Uvex Race 6	Uvex Race 2 / Uvex Race 4 / Uvex Race 6
Combinaison	Moa MC 2012	Moa MC 2012	Moa MC 2012
Couvre-chaussures	MOA CLM	MOA CLM	MOA CLM
Cadre	Specialized SHIV	Lapierre Aerostorm 2011	Lapierre Aerostorm 2011
Groupe	Shimano Di2 7900	Shimano Di2 7900	Shimano Di2 7900
Roues	Av : Shimano C50 Ar : Pro Textreme	Av : Shimano C50 Ar : Pro Textreme	Av : Shimano C75 Ar : Pro Textreme
Kit bidon	Elite CLM	aucun	aucun

Résultats

Les essais de casques sur JR ont uniquement porté sur la comparaison entre les casques Uvex Race 4 et 6 puisqu'une précédente session avait montré que le casque Race 4 était globalement plus performant de 6,1% d'un point de vue aérodynamique comparé à l'ancien casque Race 2. Les résultats obtenus montrent un phénomène intéressant puisqu'avec les conditions de vent de face (angle 0°), l'aérodynamisme du système cycliste - vélo était amélioré de 2,4% avec le port du casque Race 6 alors qu'avec les vents de côté (5, 10 et 20° à 50 km/h), le casque Race 6 dégradait la traînée totale de 3% (figures 104 et 105). Il est donc possible de tirer certains enseignements valables pour JR puisqu'en fonction des conditions environnementales, il semblerait judicieux de privilégier l'un ou l'autre de ces deux casques. En effet, l'utilisation du casque Race 6 se justifierait lors de CLM rectilignes, avec vent météo faible ou dans le sens du déplacement alors que le casque Race 4 serait davantage conseillé

sur des CLM plus courts avec beaucoup de virages, relances ou avec des portions vent de côté.

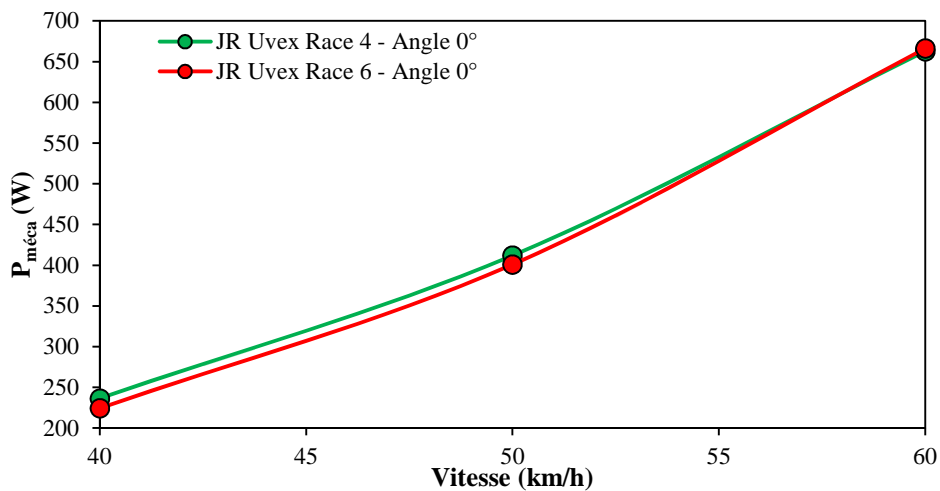


Figure 104 Relations $P_{méca}$ – vitesse de JR avec un vent d'angle de 0° avec les casques Uvex Race 4 et Race 6

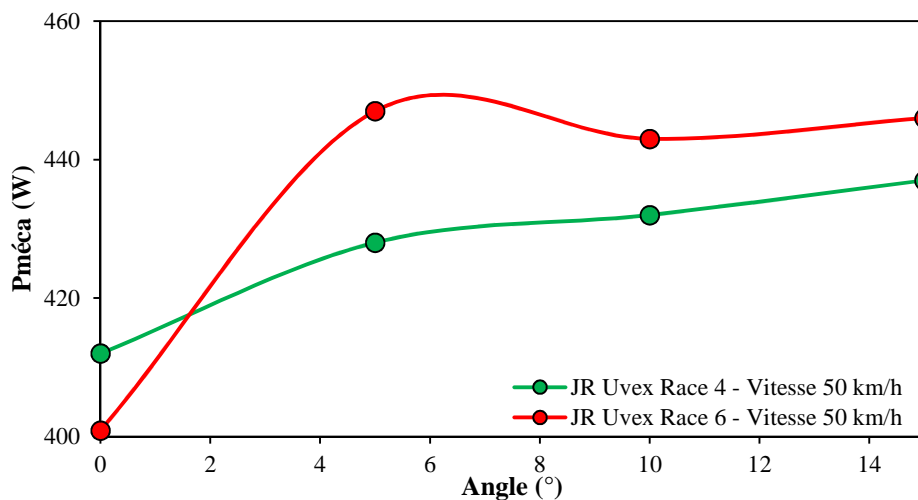


Figure 105 Relations $P_{méca}$ – angle de vent de JR avec une vitesse de 50 km/h avec les casques Uvex Race 4 et Race 6

Les résultats obtenus avec le casque Uvex Race 6 sur ML sont d'avantages significatifs et montrent que ce casque correspond beaucoup mieux à ses caractéristiques morphologiques (figures 106 et 107). En effet, quel que soit les conditions de vent, il est nettement plus performant d'un point de vue aérodynamique comparé aux casques Uvex Race 4 (-7,3%) et Race 2 (-4,2%) avec des gains moyens respectivement de 1,8 sec/km et de 1,0 sec/km pour une même $P_{méca}$.

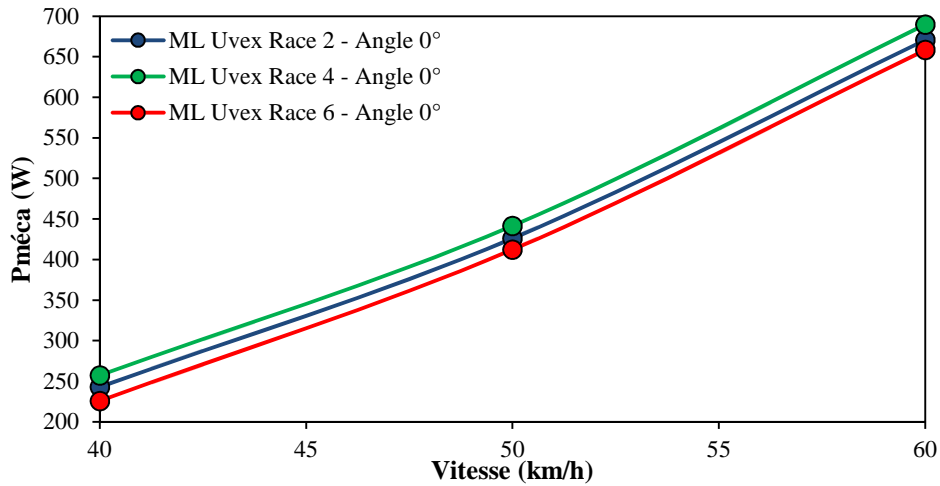


Figure 106 Relations $P_{méca}$ – vitesse de ML avec un vent d'angle de 0° avec les casques Uvex Race 2, Race 4 et Race 6

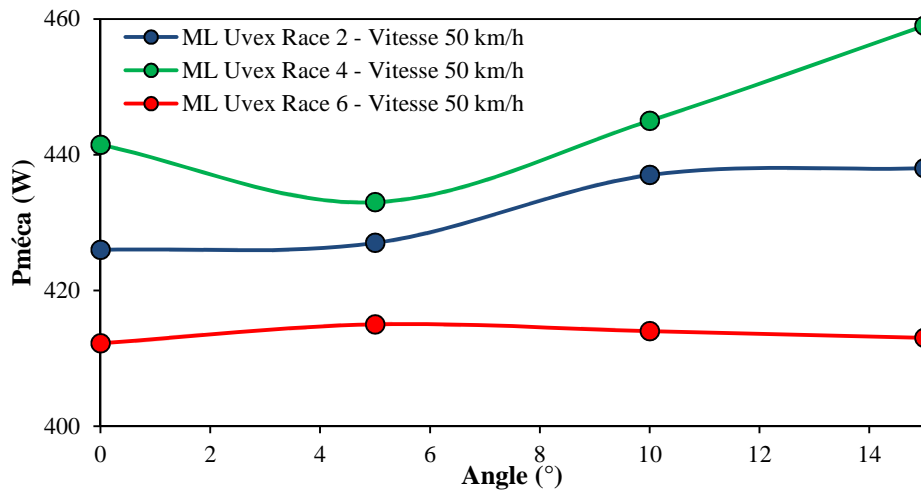


Figure 107 Relations $P_{méca}$ – angle de vent de ML avec une vitesse de 50 km/h avec les casques Uvex Race 2, Race 4 et Race 6

Les essais du casque Race 6 sur le mannequin montrent également qu'il est beaucoup plus performant d'un point de vue aérodynamique quelques soient les conditions de vent comparé aux casques Race 2 (-1,1%) et Race 4 (-2,6%) (figure 108 et 109).

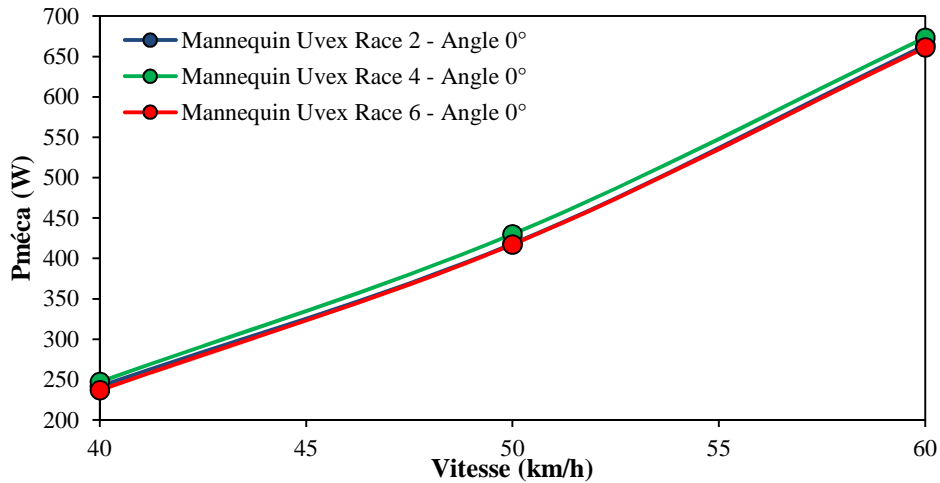


Figure 108 Relations $P_{méca}$ – vitesse du mannequin avec un vent d'angle de 0° avec les casques Uvex Race 2, Race 4 et Race 6

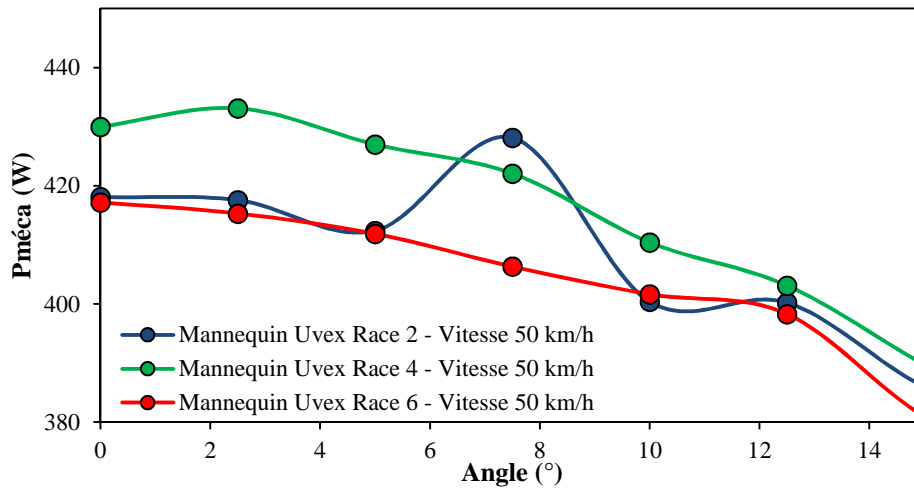


Figure 109 Relations $P_{méca}$ – angle de vent du mannequin avec une vitesse de 50 km/h avec les casques Uvex Race 2, Race 4 et Race 6

Ces essais avec deux cyclistes et le mannequin valident le travail de développement du casque Race 6 réalisé par les ingénieurs d'Uvex puisque l'utilisation de ce casque permet de diminuer systématiquement la traînée aérodynamique globale du système cycliste - vélo.

2.2. Essais sur vélodrome

Une session d'essais complémentaires a été organisée sur vélodrome avec JR afin de vérifier que nous observions les mêmes résultats en situation réelle de locomotion lors de l'étude comparative entre les deux casques Uvex Race 4 et Race 6.

Positions et matériels testés

Le tableau 24 présente les conditions expérimentales des essais de validation sur vélodrome du casque Uvex Race 6 avec JR.

Tableau 24 Matériels et équipements de JR pour les essais de validation du casque Race 6 sur vélodrome

	Test n°1 : JR
Position	CLM
Casque	Uvex Race 4 / Uvex Race 6
Combinaison	Moa MC 2012
Couvre-chaussures	MOA CLM
Cadre	Lapierre Aerostorm 2013
Groupe	Shimano Di2 9000
Roues	Av : Shimano C50 Ar : Pro Textreme
Kit bidon	Elite CLM

Résultats

L'analyse de la relation $P_{méca}$ – vitesse obtenue confirme que le casque Uvex Race 6 diminuait la traînée aérodynamique totale de JR. En comparant les $P_{méca}$ estimées à partir des SC_x mesurés en soufflerie et les $P_{méca}$ estimées à partir de la relation $P_{méca}$ – vitesse obtenue sur vélodrome (présentes dans la figure 110), nous observons une forte concordance dans les différences de $P_{méca}$ obtenues (tableau 25). En effet, les gains de $P_{méca}$ avec l'utilisation du casque Race 6 comparé au casque Race 4 étaient identiques à 40 et 50 km/h, respectivement de 5,1% et 2,7%. De plus, les relations entre la vitesse et les différences de $P_{méca}$ suivaient la même tendance. Une légère différence était cependant notable à 60 km/h mais la $P_{méca}$ estimée à cette vitesse sur vélodrome était une valeur extrapolée à partir de la relation $P_{méca}$ – vitesse puisque le protocole de mesure s'arrêtait à 50,2 km/h.

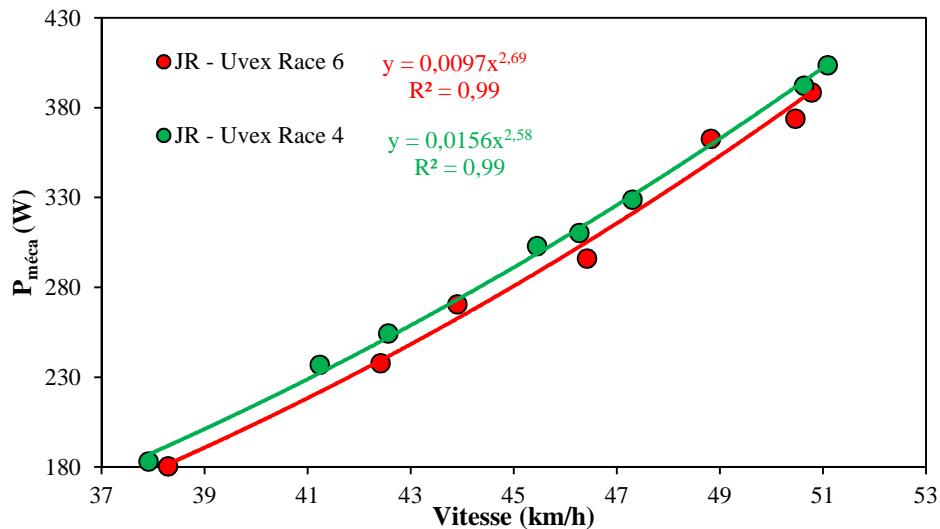


Figure 110 Relations $P_{méca}$ – vitesse de JR sur vélodrome avec les casques Uvex Race 4 et Race 6

Tableau 25 Différences des $P_{méca}$ estimées en soufflerie et sur vélodrome (en %) entre le casque Uvex Race 6 et le casque Race 4

	Soufflerie	Vélodrome
40 km/h	-5,1%	-5,1%
50 km/h	-2,7%	-2,7%
60 km/h	+0,5%	-0,6%

Il est important de noter que les valeurs brutes de $P_{méca}$ estimées sont différentes entre la soufflerie et le vélodrome pour de nombreuses raisons (par exemple à 50 km/h : 401 W en soufflerie et 372 W sur vélodrome) :

- conditions environnementales différentes (température, pression barométrique...),
- normalisation du coefficient de résistance au roulement pour le calcul de la $P_{méca}$ en soufflerie,
- influence des virages sur la production de puissance sur vélodrome : accélérations et décélérations entre les virages et lignes de droite, bénéfice de la force centrifuge dans les virages...
- pédalage et pilotage du vélo par le cycliste sur vélodrome...

Par conséquent, ce sont davantage les différences relatives en % qui sont intéressantes à analyser lors d'étude comparative entre différents matériels ou équipements, que ce soit en soufflerie et sur vélodrome. Dans ce sens, nos résultats montrent, comme l'a également récemment rapporté Garcia-Lopez *et al.* (2014), que l'utilisation du vélodrome, moins

coûteux et plus facile à mettre en place avec un grand nombre de cyclistes, demeure une méthode parfaitement valide et sensible, complémentaire à la soufflerie pour évaluer la traînée aérodynamique de l'ensemble cycliste - vélo, notamment pour le choix d'un casque de CLM. Cependant, une limite de cette méthodologie réside dans la durée nécessaire pour obtenir un résultat qui est nettement plus longue (une quinzaine de minutes) qu'en soufflerie (moins de 5 min).

Des sessions individuelles sur vélodrome avec les différents coureurs de l'équipe ont ensuite permis d'individualiser le choix du casque puisque comme nous l'avons vu, la traînée induite par le casque diffère selon la morphologie des cyclistes. Pour la majorité d'entre eux, le casque Race 6 permettait d'améliorer le gain aérodynamique, mais pour quelques-uns le choix du casque Race 4 se justifiait également.

3. Comparaison en soufflerie de casques de CLM

En août 2013, le partenariat avec Uvex a été modifié puisque les responsables de la marque ont souhaité que nous continuions à travailler avec Alpina, une société membre de leur holding. Cette société travaillait alors sur le développement de leur propre casque de course en ligne et souhaitait développer son activité en France.

Lors de notre première rencontre avec nos interlocuteurs d'Alpina, il a été convenu de réaliser une session en soufflerie afin de confronter le casque Uvex de CLM Race 6 au casque de CLM vendu par Alpina ainsi qu'avec différents casques de la concurrence faisant référence sur le marché (Kask Bambino utilisé par l'équipe Sky et Giro Selector utilisé par plusieurs équipes World Tour). Cette session devait nous aider à statuer sur le choix du casque de CLM : utiliser le casque Uvex Race 6 en le « stickant » Alpina ou développer un nouveau casque si ce dernier s'avérait moins performant que certains casques concurrents.

Positions et matériels testés

Le tableau 26 présente les conditions expérimentales des essais de comparaison en soufflerie de casques de CLM (figure 111).

Tableau 26 Matériels et équipements du mannequin pour l'étude comparative de casques en soufflerie

	Tests avec mannequin
Protocole	n°2
Position	CLM avec 2 positions de tête
Casque	Uvex Race 6 / Uvex Race 4 / Alpina TT/ Kask Bambino / Giro Selector /
Combinaison	Sans
Couvre-chaussures	MOA CLM
Cadre	Lapierre Aerostorm 2011
Groupe	Shimano Di2 7900
Roues	Av : Shimano C75 Ar : Pro Textreme
Kit bidon	aucun



Figure 111 Casques testés : Uvex Race 6 – Uvex race 4 – Alpina TT – Kask Bambino – Giro Selector

Influence de l'inclinaison de la tête

Nous observons fréquemment les cyclistes lors d'épreuves CLM avoir une position avec la tête baissée vers le bas pour regarder le compteur présent sur le cintre ou tout simplement pour relâcher les muscles de la nuque et des trapèzes. Suivant la forme du casque, le profilage de l'ensemble cycliste - vélo se trouve nettement modifié, ce qui entraîne probablement des conséquences sur la traînée aérodynamique totale. Ainsi, l'articulation de la tête présente sur le mannequin permettait de réaliser des essais avec deux positions différentes de la tête afin de mesurer l'influence de l'inclinaison de la tête sur la traînée aérodynamique totale (figure 112).



Figure 112 Casques Uvex Race 6 sur le mannequin en position standard et position de tête inclinée vers le bas

Résultats

Les résultats, présentés dans les figures 113 et 114 et dans le tableau 27, confirment ceux obtenus précédemment : le casque Uvex Race 6 sur le mannequin est au niveau des meilleurs casques quelle que soit la position de la tête. Bien que sa forme soit très différente de celle du casque Kask Bambino, leurs performances aérodynamiques sont très proches, sans différence significative quel que soit le sens du vent et la position de la tête. En comparaison avec le casque bol Uvex Race 4, l'arrière du Kask Bambino, beaucoup plus travaillé, favorise l'écoulement de l'air aussi bien avec vent de face que vent de côté et tête baissée. Il convient de noter qu'avec une position de tête baissée vers le bas, la différence entre le casque Race 6 et le Race 4 est très nettement diminuée, ce qui peut expliquer qu'il puisse être une alternative intéressante chez certains cyclistes ayant une morphologie différente de celle du mannequin. En ce qui concerne le casque Giro Selector, les résultats montrent qu'il est également très proche du casque Uvex Race 6 avec cependant une très légère dégradation de la traînée totale (+0,6%) avec la tête baissée. Enfin, en ce qui concerne le casque commercialisé jusqu'alors par Alpina, son impact sur la traînée aérodynamique totale est négatif, surtout avec une position de la tête inclinée vers le bas (+1,9%) notamment dû au fait qu'il soit creux dans sa partie inférieure et sans visière.

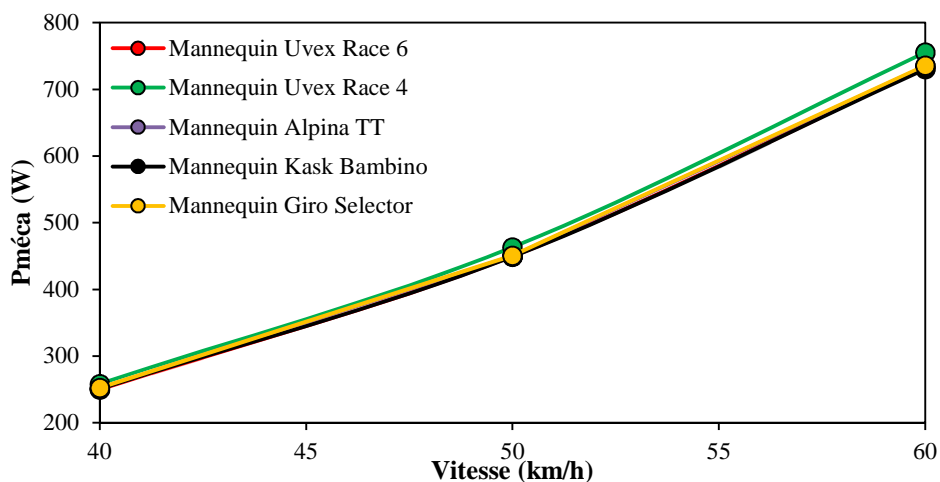


Figure 113 Relations $P_{méca}$ – vitesse du mannequin avec un vent d'angle de 0° avec les différents casques (position standard de la tête)

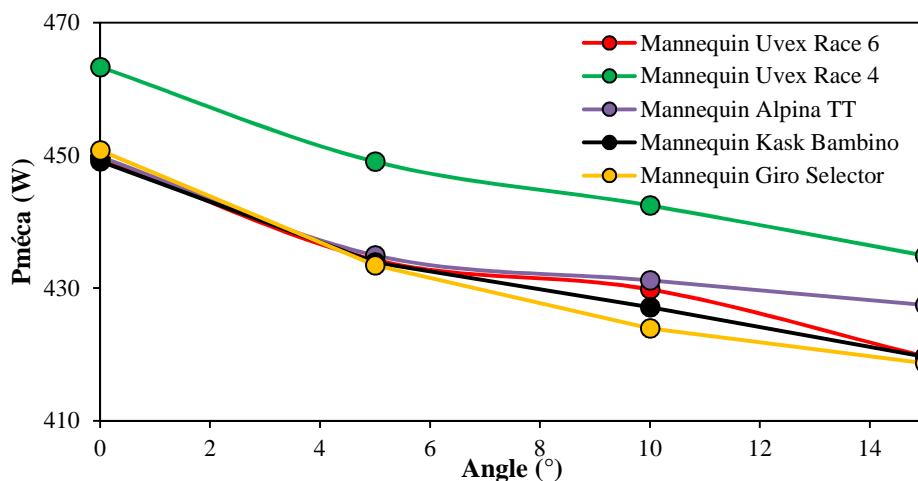


Figure 114 Relations $P_{méca}$ – angle de vent du mannequin avec une vitesse de 50 km/h avec les différents casques (position standard de la tête)

Il est intéressant de noter que l'inclinaison de la tête avec le casque Race 6 ne dégrade que légèrement l'aérodynamisme global de l'ensemble cycliste - vélo puisque, comme avec le casque Kask Bambino, la traînée totale n'est augmentée que de 0,5%. Cependant on remarque que cette différence est dépendante de la géométrie du casque puisqu'elle est de 0,9 % avec le modèle Giro et de 1,6 % avec le modèle Alpina.

Tableau 27 Différences relatives de $P_{méca}$ (en %) entre les différents casques par rapport au casque CLM Uvex Race 6

		Uvex Race 4	Alpina Elexxion TT	Kask Bambino	Giro Selector
Position standard de la tête	Angle 0°	+3,2%	+0,3%	0,0%	+0,6%
	Angle 5-10-15°	+3,3%	+0,8%	-0,2%	-0,6%
	Moyenne globale	+3,3%	+0,5%	-0,1%	0,0%
Position de tête inclinée vers le bas	Angle 0°	+1,0%	+2,0%	+0,2%	+0,6%
	Angle 5-10-15°	+1,4%	+1,8%	-0,2%	+0,6%
	Moyenne globale	+1,2%	+1,9%	0,0%	+0,6%

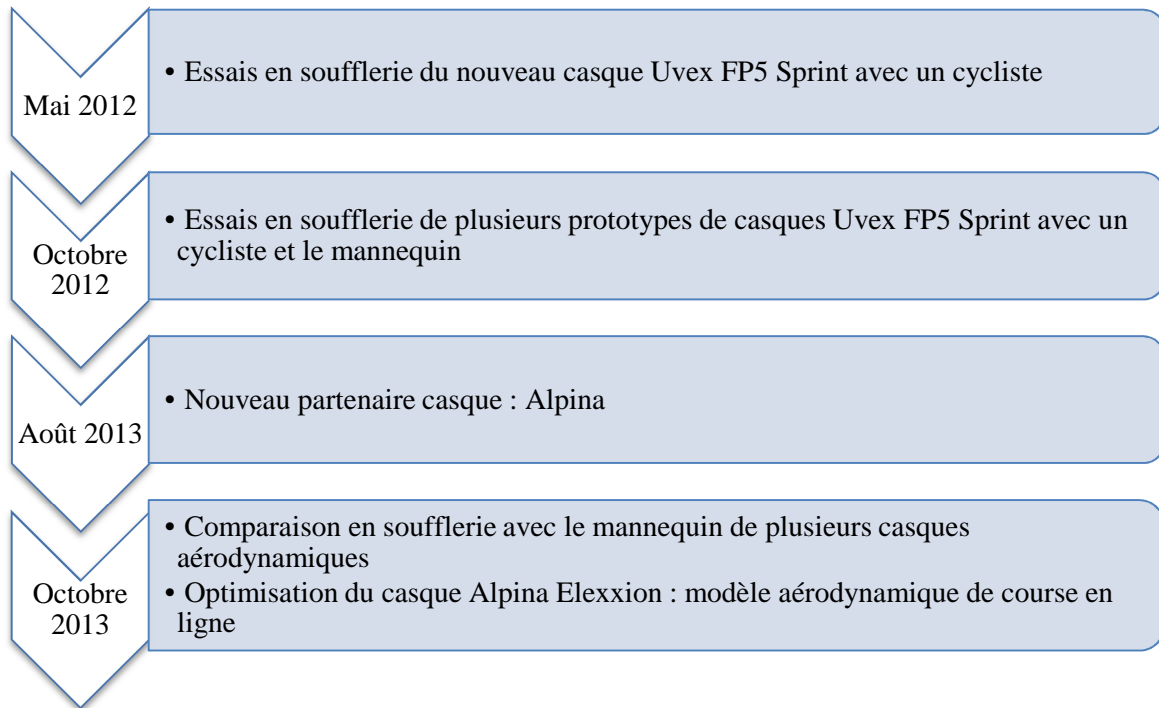
4. Conclusion

Les résultats obtenus en soufflerie montrent que le casque Race 6 développé au cours de ce travail de collaboration avec Uvex est le casque le plus performant d'un point de vue aérodynamique comparé aux autres casques des marques concurrentes que nous avons testé. En effet, les différentes études comparatives qui ont été conduites montrent que ce modèle est celui qui permet de diminuer le plus la traînée aérodynamique.

Encore une fois, il convient de rappeler que l'ensemble des résultats de ces études de casques sont dépendants de la morphologie du cycliste sur la base duquel le mannequin a été réalisé. De même, une limite dans la méthodologie utilisée avec les essais de casques sur le mannequin réside dans le fait qu'il reste parfaitement immobile. En effet, les mouvements latéraux du buste et de la tête d'un cycliste en situation réelle de pédalage peuvent également avoir des conséquences sur la pénétration dans l'air globale, notamment avec la position de la tête inclinée vers le bas.

Suite à ces essais, il a été décidé de conserver les modèles Uvex Race 6 et Race 4 pour la saison 2014, au choix pour les coureurs à partir de sessions effectuées sur vélodrome avec les différents coureurs de l'équipe FDJ. Alpina étant une filiale de la holding dont fait partie Uvex, il était possible de sticker ces casques en Alpina. En effet, comme ces résultats l'ont montré, le casque Uvex Race 6 était un excellent compromis dans les différentes situations testées (vent de face, vent de côté et tête inclinée vers le bas) puisque les meilleurs casques des équipes concurrentes n'apportaient pas de gains aérodynamiques comparés à ce modèle. Le contrat de partenariat avec Alpina n'encourant que pour une seule année, le développement d'un nouveau casque de CLM ne s'avérait donc pas être une priorité dans l'immédiat.

CHAPITRE 4 : Etude aérodynamique de casques de course en ligne



Parallèlement à l'étude des casques de CLM, notre collaboration avec Uvex puis Alpina a porté sur les casques aérodynamiques de course en ligne. Ce type de casque est arrivé dans le peloton dans certaines équipes au cours de la saison 2011. Une des premières missions dans ce travail de développement et de collaboration avec le partenaire technique a consisté à montrer l'intérêt d'un tel casque pour ensuite pouvoir en équiper les coureurs sprinters afin d'améliorer leur pénétration dans l'air lorsqu'ils produisent leur effort maximal dans les arrivées en sprint massif. Vu l'importance de la vitesse maximale dans une arrivée au sprint (vitesses pouvant aller jusqu'à 75 km/h), les différences entre les coureurs peuvent être infimes, de l'ordre de quelques centimètres, chaque détail a donc son importance.

Jusqu'à présent, le choix des casques de courses en ligne se faisait sur la base du meilleur compromis entre le poids et le confort afin de ressentir le moins possible les effets négatifs du port du casque au niveau thermorégulation (aérations) et bien-être (poids, mousses de protection...).

1. Essai du casque aérodynamique Uvex FP5

La première étape de ce travail a consisté à tester les effets aérodynamiques du port du casque traditionnel doté d'une coque externe sans aérations. Pour cela, nous avons préalablement demandé à Uvex un casque avec une coque interne identique à celle du modèle standard FP5 mais équipée d'une coque externe sans les aérations. Il suffisait donc de coller une coque externe sans que les trous des aérations soient percés.

Les essais en soufflerie ont consisté à comparer l'aérodynamisme du casque Uvex FP5 standard avec celui du casque FP5 muni d'une coque externe sans aérations, appelé « sprint » (figure 115). Ces sessions ont été réalisées avec un coureur adoptant une position de sprinter c'est-à-dire debout sur les pédales, mais sans pédaler afin d'augmenter la répétabilité des mesures (figure 116).

Positions et matériels testés

Le tableau 28 présente les conditions expérimentales des essais en soufflerie du casque aérodynamique de course en ligne.

Tableau 28 Matériels et équipements de IG pour les essais du casque Uvex FP5 sprint en soufflerie

	Test n°1 : IG
Protocole	n°1
Position	Position sprint – debout sur les pédales, sans pédaler
Casque	Uvex FP5 standard / Uvex FP5 sprint
Combinaison	Moa 2012
Couvre-chaussures	MOA CLM
Cadre	Lapierre Xelius
Groupe	Shimano Di2 7900
Roues	Av : Shimano C50 Ar : Shimano C50
Kit bidon	Porte bidon Elite Route



Figure 115 Casque Uvex FP5 sprint avec coque externe sans aérations

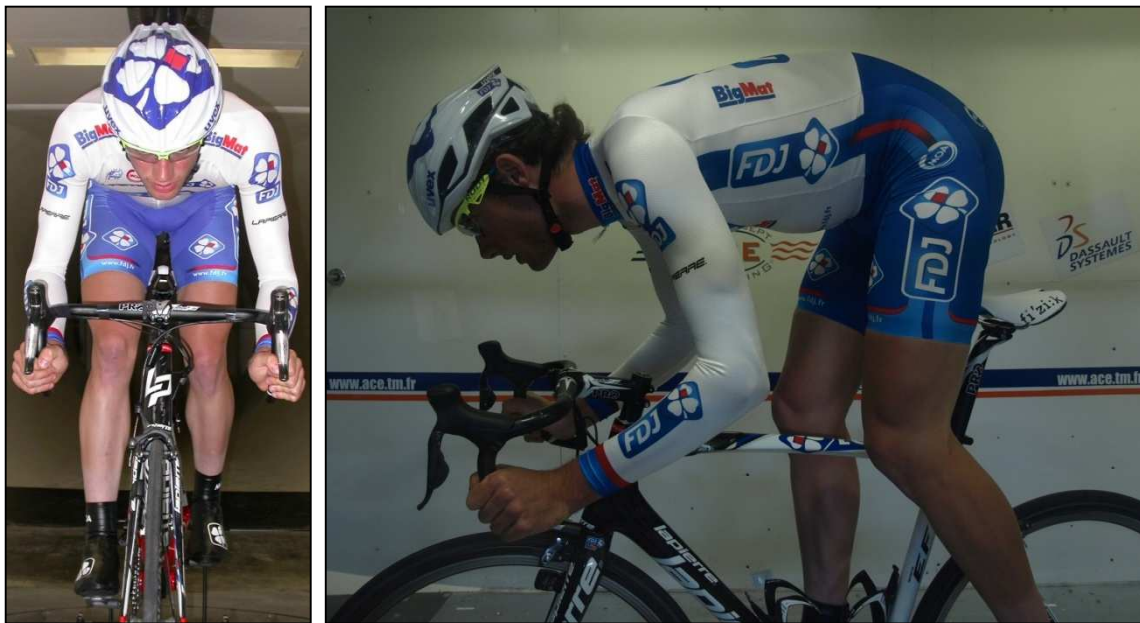


Figure 116 Position sprint : debout sur les pédales, sans pédaler

Résultats

Les résultats sont significatifs : plus la vitesse est élevée, plus l'effet du casque sans aération est important d'un point de vue aérodynamique. A 60 km/h, vitesse moyenne d'un sprint, le gain de $P_{méca}$ pour une même vitesse est de l'ordre de 35 à 45 W (4 à 5%), ce qui est considérable dans le cas d'une arrivée massive (figure 117). Nous pouvons supposer qu'à une vitesse supérieure, les gains seraient encore plus importants mais la précision de la balance de force de la soufflerie ne permettait pas de tester les effets aérodynamiques à des vitesses voisines de 70 km/h. Par conséquent, il a été décidé d'équiper nos rouleurs/sprinters d'un tel casque pour la saison 2012 et en parallèle d'optimiser celui-ci, notamment en améliorant la forme de la coque externe.

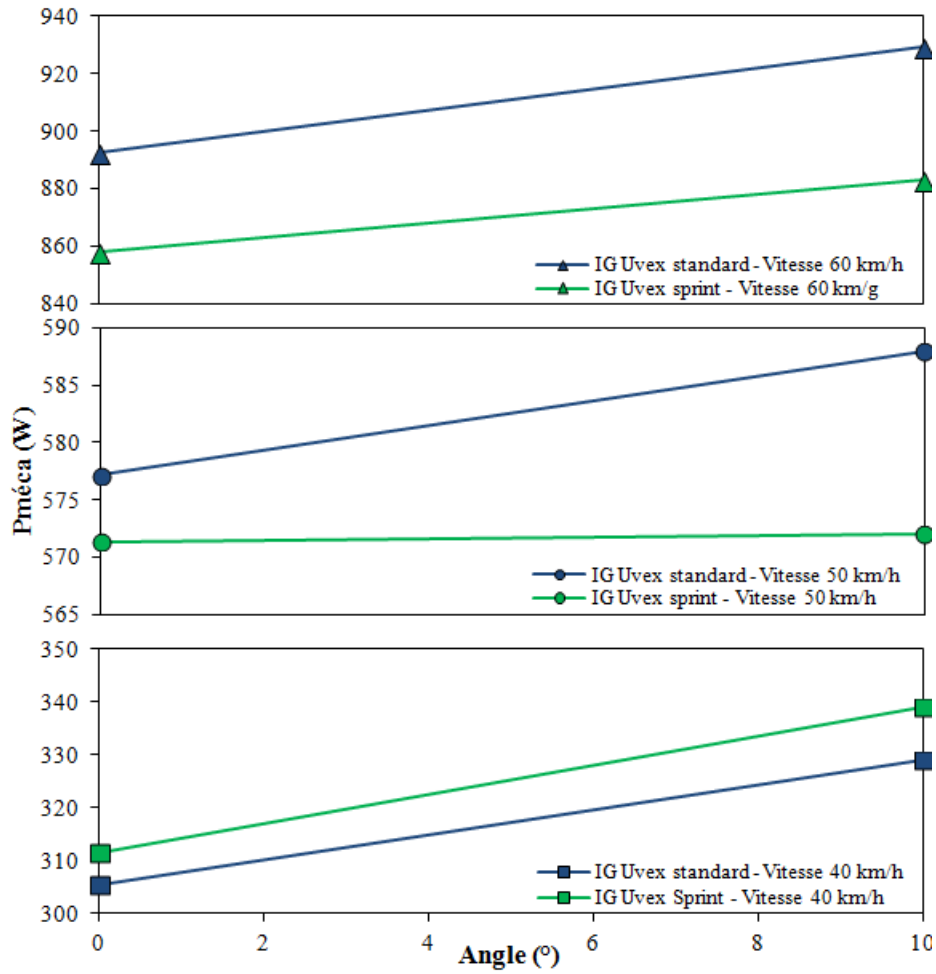


Figure 117 Relations $P_{méca}$ – angle de vent de IG pour différentes vitesses avec les deux casques

2. Validation du modèle aérodynamique du casque Uvex FP5

Suite aux premiers essais du casque aérodynamique de course en ligne, il a été demandé aux ingénieurs d’Uvex, de pouvoir essayer différentes formes de coque externe sur le casque FP5. En effet, le premier modèle présentait de nombreuses aspérités à l’endroit des aérations. Nous faisons donc l’hypothèse que la traînée aérodynamique pouvait être diminuée avec des casques dotés d’une coque externe plus lisse. Les ingénieurs d’Uvex nous ont donc fourni deux prototypes de coque externe à tester en soufflerie afin de choisir le modèle le plus performant pour la saison 2013.

Positions et matériels testés

Le tableau 29 présente les conditions expérimentales des essais en soufflerie de plusieurs casques aérodynamiques Uvex (figure 118).

Tableau 29 Matériels et équipements pour les essais du casque Uvex FP5 sprint en soufflerie

	Test n°1 avec cycliste	Test n°2 avec mannequin
Coureur	JR	Mannequin
Position	Position sprint – debout sur les pédales, sans pédaler	CLM
Casque	Uvex FP5 standard / Uvex FP5 sprint / Uvex proto 1 / Uvex proto 2	Uvex FP5 standard / Uvex FP5 sprint / Uvex proto 1 / Uvex proto 2
Combinaison	Moa 2012	Moa 2012
Couvre-chaussures	Moa CLM	Moa CLM
Cadre	Lapierre Xelius	Lapierre Aerostorm 2011
Groupe	Shimano Di2 7900	Shimano Di2 7900
Roues	Av : Shimano C50 Ar : Shimano C50	Av : Shimano C75 Ar : Pro Textreme
Kit bidon	Porte bidon Elite Route	sans



Figure 118 Casques FP5 standard, FP5 sprint avec coque externe sans aérations, FP5 avec coque externe prototype 1 et FP5 avec coque prototype 2

Résultats

Test n°1 avec cycliste en position sprint

Conformément au précédent test, un bénéfice significatif sur la traînée aérodynamique totale a été trouvé avec le port d'un casque aérodynamique de course en ligne comparé au modèle standard (figure 119). La différence à 60 km/h est légèrement plus faible que celle initialement observée puisque selon le modèle de coque la différence est comprise en 1,4 et 1,9%. Néanmoins, il n'existe pas de nette différence entre les trois modèles de coque externe puisque la hiérarchie s'inverse en fonction de l'angle du vent. La coque prototype n°1 à la surface légèrement épurée par rapport à la version de base est la plus performante avec un vent de 60 km/h d'angle 0° (-2,5%). Ces résultats obtenus avec un coureur en position de sprint sont à compléter avec les résultats suivants obtenus avec le mannequin.

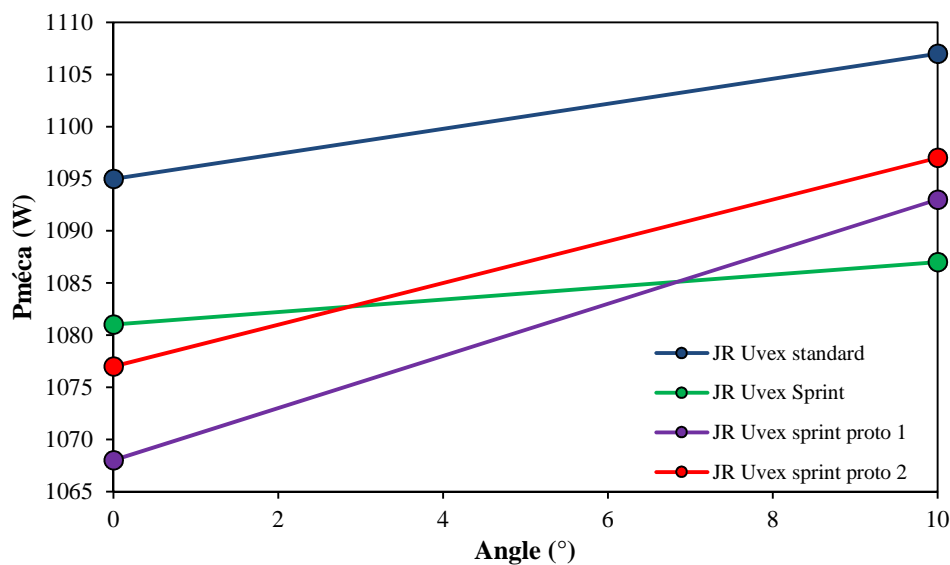


Figure 119 Relations $P_{méca}$ – angle de vent de JR à 50km/h avec les différents casques

Test n°2 avec mannequin en position de CLM

Les gains obtenus avec un casque aérodynamique peuvent également profiter aux rouleurs qui parcourent de nombreux kilomètres à l'avant de la course, que ce soit dans une échappée ou devant le peloton. Ainsi, l'utilisation du mannequin en position de CLM se justifie également pour tester l'intérêt du port d'un casque aérodynamique de course en ligne (figure 120).

Pour information complémentaire, il a été mesuré que le port du casque de CLM Uvex Race 6 améliorait la traînée aérodynamique de 4% sur le mannequin comparé au port du casque FP5 traditionnel. Il était donc intéressant de vérifier si les casques dotés de coques externes sans aérations permettaient d'améliorer la pénétration dans l'air du système cycliste - vélo dans une position de rouleur.



Figure 120 Mannequin équipé avec les quatre casques testés

Les résultats obtenus avec le mannequin étaient en accord avec ceux obtenus avec JR puisque des gains semblables étaient retrouvés, compris entre 1,3 et 1,6% par rapport au modèle standard, avec les différents modèles de coque externe sans aération (figure 121). De même qu'avec JR, le prototype n°1 semblait être légèrement plus performant que les deux autres modèles mais les différences n'étaient pas significatives (moins de 0,5%). Au regard des gains aérodynamiques marginaux avec ce modèle et de la complexité de production d'une telle coque externe, Uvex a décidé de continuer à nous fournir pour la saison 2013 le même modèle de casque « sprint » que pour la saison 2012.

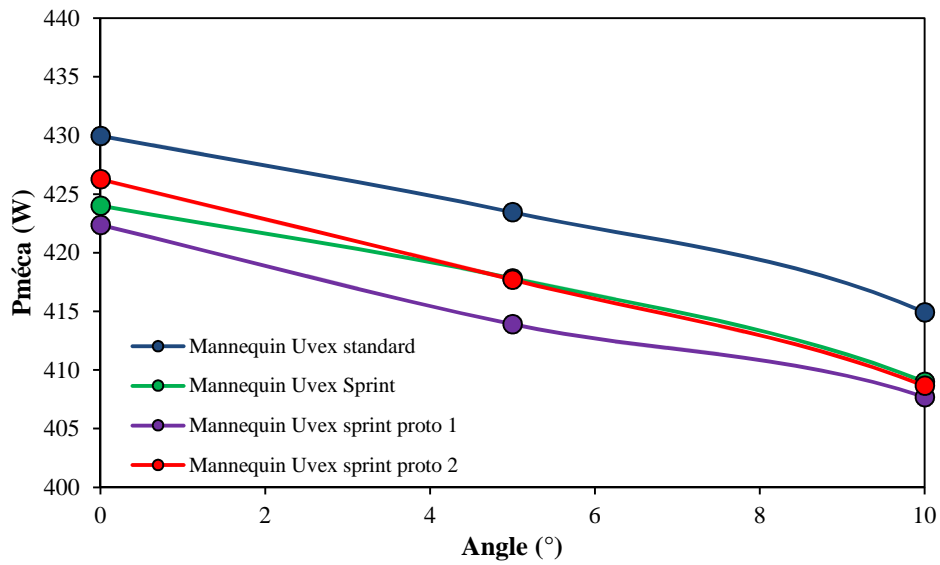


Figure 121 Relations $P_{méca}$ – angle de vent du mannequin à 50km/h avec les différents casques

Les essais avec le mannequin ayant été réalisés en position de CLM, les résultats montrent que les casques aérodynamiques de course en ligne ont également un intérêt pour les rouleurs puisqu'ils permettent d'économiser quelques watts non négligeables sur plusieurs heures. En effet, les différences observées sur la traînée aérodynamique sont équivalentes à des gains chronométriques de 0,3 sec/km pour une même $P_{méca}$ produite en roulant à l'avant de la course. Suite à ces essais, il a donc été décidé d'équiper l'ensemble des coureurs de l'équipe FDJ de ces casques spécifiques pour une utilisation qui se justifie dans des situations telles que les sprints, les échappées, les bordures, les poursuites à l'avant du peloton...

3. Optimisation du modèle aérodynamique du casque Alpina Elexxion

Le partenariat avec Uvex ayant été modifié au cours de l'été 2013, une collaboration avec notre nouveau partenaire Alpina a débuté autour du développement d'un modèle innovant de casque de course en ligne. Le casque Elexxion, développé par les ingénieurs d'Alpina, a pour avantage de favoriser la ventilation du crâne avec de grandes aérations. Pour maintenir la solidité du casque, une armature en plastique est placée autour des aérations et à l'intérieur de la coque (figure 122). Le poids de ce casque est également plus faible que le modèle Uvex FP5 utilisé précédemment (220 contre 240 g).



Figure 122 Prototype du casque Alpina Elexxion (flèches rouges mettant en évidence l'armature en plastique)

Concernant le casque aérodynamique de course en ligne, une coque externe est prévue pour se fixer sur le même modèle. Il a été convenu de collaborer sur l'optimisation de cette coque. De ce fait, les ingénieurs d'Alpina nous ont fournis un certain nombre de coques sans aérations (figure 123) nous permettant de réaliser des essais en soufflerie afin de déterminer la configuration de coque externe la plus performante au niveau aérodynamique. Ainsi, de multiples essais de configurations ont été testés en lissant la surface et/ou en ouvrant des aérations qui n'auraient pas ou peu d'impact sur la pénétration dans l'air, mais qui permettraient dans le même temps de favoriser la thermorégulation notamment en cas de fortes chaleurs. De plus, les ingénieurs d'Alpina se sont également montrés intéressés pour évaluer l'aérodynamisme de leur casque en comparaison avec la concurrence, notamment avec les modèles Giro Air Attack et Specialized Evade qui faisaient référence sur le marché. Par conséquent, l'objectif de la session en soufflerie a été double :

- 1) comparer le casque Alpina avec les casques aérodynamiques de course en ligne Giro, Specialized et Uvex utilisé jusqu'à cette date par l'équipe FDJ ;

- 2) optimiser la coque externe du casque Alpina Elexxion pour diminuer la traînée aérodynamique totale



Figure 123 Coque externe sans aérations du modèle de casque Elexxion

Positions et matériels testés

Le tableau 30 présente les conditions expérimentales des essais en soufflerie de différents casques aérodynamiques de course en ligne.















Tableau 30 Matériels et équipements pour les essais de casques en soufflerie













	Tests avec mannequin
Protocole	n°2
Position	CLM avec deux positions de tête
Casque	Uvex FP5 sprint / Giro Air Attack / Specialized Evade / Alpina Elexxion standard + protos
Combinaison	sans
Couvre-chaussures	Moa CLM
Cadre	Lapierre Aerostorm 2011
Groupe	Shimano Di2 7900
Roues	Av : Shimano C50 Ar : Shimano C50
Kit bidon	sans

Résultats

Le tableau 31 présente les différents casques et prototypes de coques Alpina Elexxion testés. Les résultats ont été moyennés pour chaque inclinaison de tête.

Tableau 31 Visualisations des casques et coques testés avec leur impact sur la traînée aérodynamique totale en comparaison avec le casque référence Alpina Elexxion standard

	Casques testés		Position tête standard	Position tête inclinée vers le bas
ALPINA Elexxion standard			Réf.	Réf.
UVEX FP5 sprint			-1,8%	-1,2%
SPECIALIZED Evade			-1,1%	-4,8%
GIRO Air Attack			-0,9%	-3,0%
ALPINA Elexxion Coque sans aérations			-2,4%	0,0%
ALPINA Elexxion Proto n°1			-1,2%	+0,3%
ALPINA Elexxion Proto n°2			-1,6%	-1,5%

ALPINA Elexxion Proto n°3			-1,4%	+0,1%
ALPINA Elexxion Proto n°4			-1,3%	+0,3%
ALPINA Elexxion Proto n°5			-1,9%	-0,3%
ALPINA Elexxion Proto n°6			-1,2%	-1,0%
ALPINA Elexxion Proto n°7			-1,4%	-1,2%
ALPINA Elexxion Proto n°8			-1,2%	-1,0%

Les résultats montrent qu'il existe des différences significatives entre les différents casques, avec des écarts variant selon l'inclinaison de la tête. Il est donc difficile de comparer chaque casque dans chaque condition (angle du vent, inclinaison de la tête...). Néanmoins l'observation des différences moyennes entre les casques semble être le meilleur moyen de procéder pour évaluer l'impact global de chaque casque sur la traînée. La référence étant le casque Alpina Elexxion standard possédant de larges aérations, il est intéressant d'observer les différences de traînée aérodynamique au regard de cette référence.

Ainsi, le premier résultat majeur montre que si l'on compare globalement le modèle standard Alpina Elexxion et le Specialized Evade, la différence est de 2,9%, ce qui équivaut à une perte chronométrique de 1,2 sec/km à une vitesse de 50 km/h pour une même $P_{\text{méca}}$ développée. Dans le cas d'une arrivée au sprint avec des vitesses voisines de 60-70 km/h, la différence est conséquente et peut atteindre 30 à 40 W. Par conséquent, l'optimisation de la coque du casque Alpina Elexxion se justifie afin de diminuer cet écart.

L'étude comparative des différents casques montre que les casques Giro Air Attack mais surtout Specialized Evade sont plus performants d'un point de vue aérodynamique que 1) les différents modèles prototypes Alpina Elexxion et 2) le casque Uvex FP5 sprint utilisé en 2012 et 2013 par l'équipe FDJ. Avec une position de la tête inclinée vers le bas, les gains sur la traînée totale en comparaison du casque référence atteignent respectivement 4,8% et 3,0% pour le casque Specialized et le Giro. De leur côté, le casque Uvex FP5 sprint et les meilleurs prototypes Elexxion n'améliorent la pénétration dans l'air que de 1,2 à 1,5%.

Neuf modèles de coques ont été testés sur le casque Alpina Elexxion. Différents types d'optimisation ont été réalisées sur la coque avec notamment des essais de lissage des arrêtes et des creux avec de la plasticine ou encore avec l'ouverture de différentes aérations. Il en ressort qu'avec 5 modèles de coques différentes (modèle sans aération + prototypes n°5, 6, 7 et 8), il est possible d'atteindre une traînée aérodynamique globale équivalente à celle du casque Uvex FP5 sprint utilisé jusqu'alors par l'équipe. Il n'a pas été possible en repartant de la base du modèle Elexxion de faire mieux qu'un gain aérodynamique de 1,5% comparé au modèle standard. Pour rappel, c'est également un gain de cet ordre que nous avons obtenu un an auparavant avec les essais d'optimisation du casque Uvex FP5. Le fait de lisser les arrêtes et creux de la coque montrent une tendance positive sur les performances aérodynamiques.

Suite à ces résultats, la méthode de la visualisation dans le volume d'écoulement avec un fil de laine a été utilisée afin d'interpréter les différences observées. En effet, l'observation de l'écoulement du flux d'air a permis de mettre en lumière les raisons pour lesquelles les casques Giro et Specialized diminuaient nettement la traînée aérodynamique totale de l'ensemble cycliste - vélo, bien qu'ils possèdent de nombreuses aérations. L'observation de l'écoulement du fil de laine aux alentours du casque montrait l'excellente circulation du flux d'air à l'intérieur du casque grâce aux aérations parfaitement situées et orientées (figure 124).



Figure 124 Aérations du casque Specialized Evade et visualisation de l'écoulement laminaire à l'arrière du casque

Manifestement, cela évite la création de remous et turbulences derrière le casque, qui sont néfastes au niveau aérodynamique, comme observé sur les casques Uvex FP5 et Alpina Elexxion. Comme le montre figure 125, le fil de laine s'orientait à l'opposé du sens de l'écoulement, démontrant les fortes turbulences à cet endroit. Cela a permis de mettre en évidence pourquoi les coques prototypes avec des aérations centrales (où l'air circule à l'intérieur du casque) sont meilleures d'un point de vue aérodynamique que celles avec des aérations sur le côté où le flux d'air s'engouffre dans le casque sans pouvoir circuler à l'intérieur. Néanmoins, ne pouvant atteindre les performances aérodynamiques des casques Specialized et Giro avec la base du casque Alpina Elexxion, il paraît nécessaire de considérer le casque dans son ensemble (coque interne + coque externe) pour améliorer l'aérodynamisme totale.

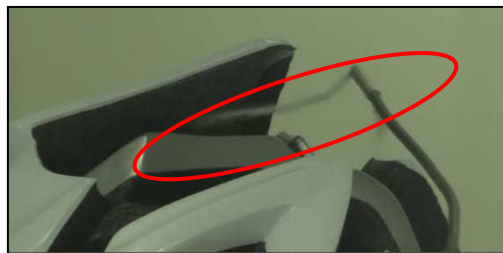


Figure 125 Visualisation de l'écoulement turbulent à l'arrière du casque Alpina Elexxion

4. Conclusion

Suite aux résultats de la précédente étude portée sur la comparaison et l'optimisation du modèle aérodynamique du casque Elexxion de notre partenaire Alpina, il a été convenu avec les ingénieurs d'Alpina de :

- 1) Produire pour la saison 2014 un casque Alpina Elexxion doté d'une coque sans aérations mais ajouré au niveau de la partie arrière de la coque (figure 126), ce qui entraîne un meilleur écoulement du flux d'air comme observé avec la visualisation de l'écoulement avec le fil de laine. Les ingénieurs Alpina ont indiqué que l'étude de l'industrialisation d'une coque lisse sans arrête ou creux ne serait pas rentable vu le temps de développement requis et des faibles gains obtenus.

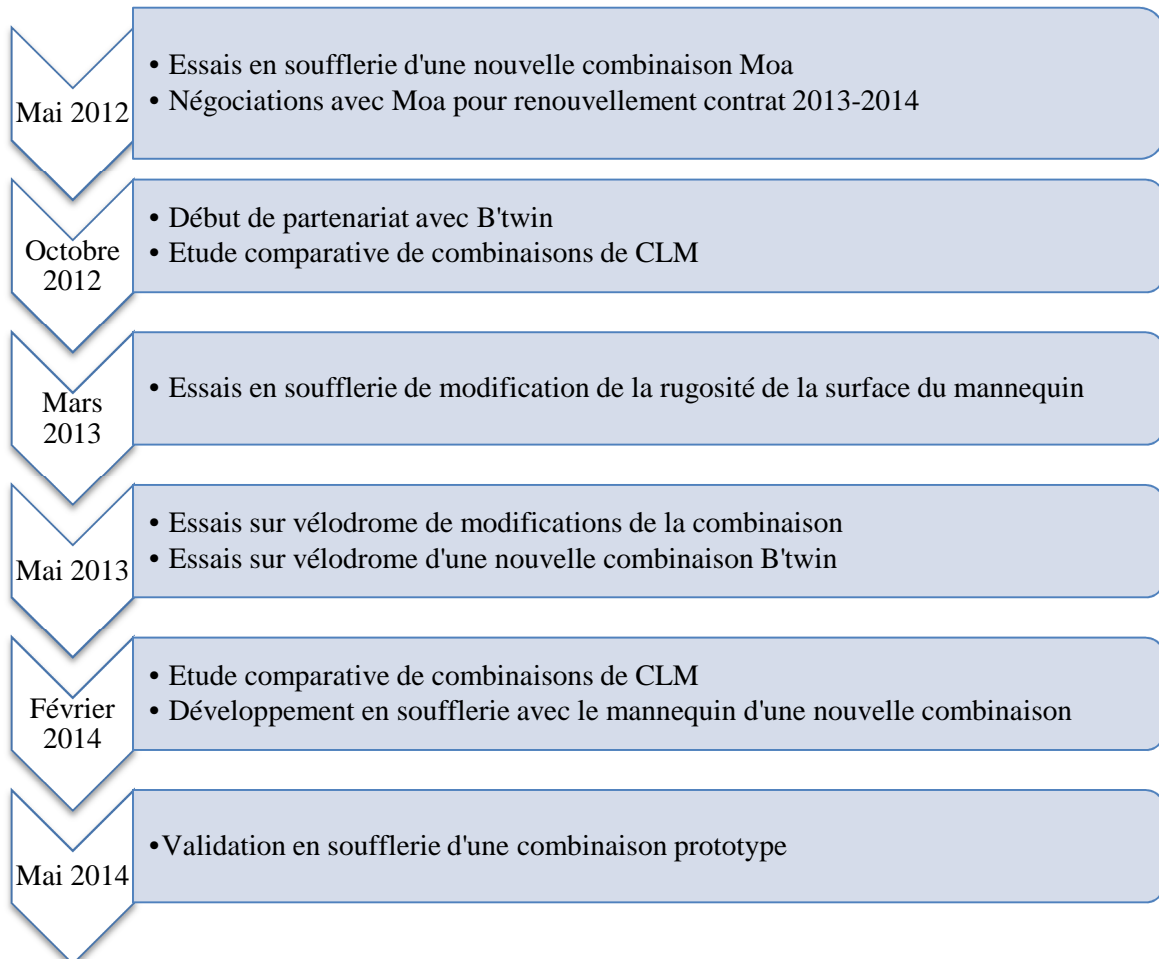


Figure 126 Coque externe choisie pour le modèle aérodynamique du casque Alpina Elexxion

- 2) Réaliser une étude de recherche et développement d'un casque aérodynamique spécifique de course en ligne en considérant sa construction dans son ensemble. L'objectif fixé est d'obtenir un casque de course en ligne aussi performant d'un point de vue aérodynamique que le casque Specialized Evade, dont les gains aérodynamiques sont clairement significatifs.

Le délai de réalisation de ce projet avait pour objectif initial de fournir les premiers casques pour la période de Tour de France (juillet 2014). Malheureusement, les ingénieurs d'Alpina travaillant en collaboration avec ceux d'Uvex pour ce projet ne nous ont pas inclus dans leur processus de R&D malgré nos désirs formulés dans ce sens. De la même manière que pour le développement du casque de CLM Uvex Race 6, ils nous ont seulement informé qu'ils se basaient sur une étude CFD réalisée avec l'aide d'une université allemande et qu'ils nous solliciteraient pour la phase finale de validation. Etant dépendant du rôle donné par ce partenaire dans ses projets R&D, l'équipe devrait solliciter de nouvelles sociétés de casques pour le contrat de partenariat portant sur les années 2015 – 2016.

CHAPITRE 5 : Etude aérodynamique sur les combinaisons de CLM



Jusqu'au début de ce travail, la collaboration avec Moa sur les combinaisons de CLM consistait en de simples échanges suite aux essais en soufflerie avec des combinaisons composées de textiles et de coupes différentes. Ainsi, un certain nombre de sessions en soufflerie ont été organisés afin de comparer les combinaisons de CLM utilisées par l'équipe avec celles des équipes concurrentes. Lorsqu'une combinaison plus performante d'un point de vue aérodynamique était trouvée, elle était rapidement fournie aux ingénieurs de Moa afin qu'ils puissent nous fournir une combinaison comportant les mêmes propriétés de textile. Lors d'études antérieures, nous avons observé que certaines combinaisons adoptant un textile plus rugueux apportaient des gains significatifs de pénétration dans l'air. C'est l'une des raisons pour laquelle, les coureurs de l'équipe FDJ utilisaient depuis 2010 une combinaison réalisée avec un textile alvéolé dans sa partie supérieure (bras + buste).

Notre travail sur les combinaisons de CLM a été composé de deux volets se déroulant en parallèle au cours des trois années :

- un premier volet portant sur des études comparatives de combinaisons réalisées en soufflerie ou sur vélodrome qui avait pour but de comparer et déterminer les meilleures combinaisons afin d'en équiper les coureurs de l'équipe ;
- un second volet d'avantage orienté sur des recherches fondamentales afin de mieux comprendre l'influence de la surface du textile des combinaisons sur la traînée aérodynamique en vue de la réalisation d'une combinaison de CLM innovante et performante.

1. Etude comparative en soufflerie de combinaisons de CLM Moa

Lors de notre rencontre initiale au printemps 2012 visant à présenter notre nouvelle démarche méthodologique de collaboration, les ingénieurs Moa nous ont fait part d'une nouvelle combinaison dotée d'un textile ultra-lisse inspiré des combinaisons de natation. Cette combinaison possédait une coupe avec moins de coutures, moulant de près le corps des athlètes et provoquant moins de plis que la précédente combinaison. Une session en soufflerie avec trois coureurs de l'équipe a été organisée afin de tester les réels gains aérodynamiques de cette combinaison « révolutionnaire ».

Positions et matériels testés

Le tableau 32 présente les conditions expérimentales des essais en soufflerie des nouvelles combinaisons Moa (figure 127).



Figure 127 Combinaisons Moa testées : alvéolée 2011 manches longues, lisse 2012 manches longues et lisse 2012 manches courtes

Tableau 32 Matériels et équipements pour les essais de la nouvelle combinaison Moa en soufflerie

	Test n°1 : AJ	Test n°2 : JR	Test n°3 : YO
Protocole	n°1	n°1	n°1
Position	CLM	CLM	CLM
Casque	Uvex Race 2	Uvex Race 4	Uvex Race 4
Combinaison	Moa 2011 / Moa 2012 MC et ML	Moa 2011 / Moa 2012 MC et ML	Moa 2011 / Moa 2012 MC et ML
Couvre-chaussures	Moa CLM	Moa CLM	Moa CLM
Cadre	Lapierre Aerostorm 2011	Lapierre Aerostorm 2011	Lapierre Aerostorm 2011
Groupe	Shimano Di2 7900	Shimano Di2 7900	Shimano Di2 7900
Roues	Av : Shimano C50 Ar : Pro Textreme	Av : Shimano C50 Ar : Pro Textreme	Av : Shimano C50 Ar : Pro Textreme
Kit bidon	sans	sans	sans

Résultats

Les résultats montrent que la nouvelle combinaison apportait des gains aérodynamiques significatifs (figure 128). En effet, en globalisant les $P_{méca}$ estimées avec les trois coureurs dans les différentes conditions de vent, la nouvelle combinaison avec manches courtes permettait une économie de $P_{méca}$ de 2,3%, ce qui équivalait à un gain moyen de 0,7 sec/km pour une même $P_{méca}$.

Cette combinaison était dotée d'une nouvelle matière textile, très fine et très moulante, avec moins de coutures et un col ras-du-cou. Elle a été testée dans les deux versions manches longues et manches courtes. Contrairement à nos attentes et aux résultats précédemment obtenus en soufflerie, la combinaison avec les manches courtes était significativement plus performante que celle avec les manches longues. En effet, cette dernière augmentait la traînée totale de 1,7% comparé au modèle manches courtes. Il apparaît que la dégradation de la pénétration dans l'air avec le port de manches longues se fasse principalement à un angle de vent de 10°. De prochaines études en soufflerie, notamment avec l'aide du mannequin, devraient permettre de mieux comprendre l'impact des textiles sur l'écoulement de l'air autour du cycliste.

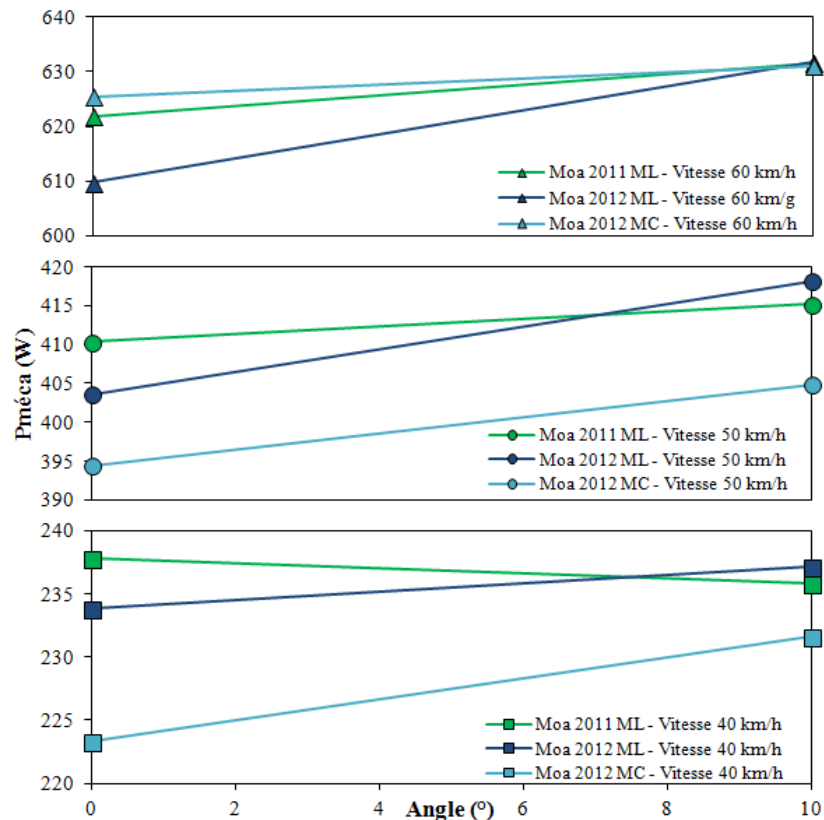


Figure 128 Relations moyennes $P_{méca}$ – angle du vent aux différentes vitesses des trois combinaisons Moa

Par conséquent, il a été décidé d'équiper l'ensemble des coureurs de l'équipe avec cette combinaison manches courtes pour les CLM de la saison 2012.

A la suite de ces essais en soufflerie, les négociations avec Moa ainsi qu'avec d'autres sociétés de vêtements cyclistes ont été entreprises afin de choisir le partenaire pour les saisons 2013 et 2014. La possibilité de collaboration dans les projets de développements des différents équipements textiles a été un facteur déterminant dans le choix du partenaire. C'est ainsi qu'à l'automne 2012, le choix s'est orienté vers la société française B'twin.

2. Etude comparative en soufflerie de combinaisons de CLM de marques concurrentes

La première étape dans le processus de collaboration avec B'twin a été de réaliser une nouvelle étude comparative de combinaisons. Nous avons ainsi organisé une session en soufflerie pour comparer la combinaison Moa 2012 manches courtes précédemment validée avec 1) une combinaison de marque Vermarc d'une équipe concurrente doté d'un textile

rugueux au niveau des bras et d'une matière lisse au niveau du buste, et 2) de deux combinaisons de marque Bioracer utilisées par l'équipe de France : l'une avec une matière épaisse et alvéolée (équipe de France Route), l'autre avec une matière extra fine et lisse (équipe de France Piste).

Positions et matériels testés

Le tableau 33 présente les conditions expérimentales des essais en soufflerie de plusieurs combinaisons (figure 129).

Tableau 33 Matériels et équipements pour l'étude comparative de combinaisons en soufflerie

	Test avec JR
Protocole	N°2
Position	CLM
Casque	Uvex Race 6
Combinaison	Moa 2012 / Vermarc / Bioracer (x2)
Couvre-chaussures	Moa CLM
Cadre	Specialized SHIV
Groupe	Shimano Di2 7900
Roues	Av : Shimano C50 Ar : Pro Textreme
Kit bidon	Elite CLM 2012

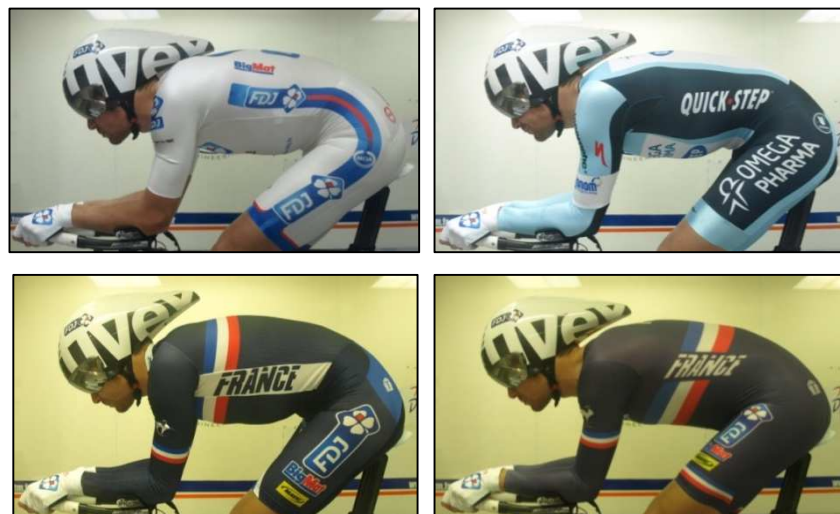


Figure 129 Combinaisons testées : Moa 2012, Vermarc, Bioracer 1 alvéolée et Bioracer 2 lisse.

L'analyse des résultats montre que la combinaison Moa 2012 était le modèle le plus performant au niveau aérodynamique (tableau 34). Les différences obtenues avec les autres

combinaisons testées étaient en effet importantes. La combinaison Vermarc utilisée par l'équipe Omega Pharma – Quick Step était moins performante de 6,1%. Elle était semblable à celle en lycra que nous possédions il y a quelques années mais avec les bras composés d'un textile rugueux. Les combinaisons Bioracer utilisées par l'équipe de France Route (épaisse avec de larges alvéoles) et Piste (extra fine et lisse) étaient respectivement moins performantes de 4,8% et 3,4%. Néanmoins, la combinaison Bioracer fine et lisse, prévue spécifiquement pour les épreuves de vitesse sur piste, était 3% plus performante d'un point de vue aérodynamique à une vitesse de 60 km/h. En moyenne, la combinaison Moa utilisée lors de la saison 2012 apportait des gains chronométriques de plus de 1 sec/km pour une même $P_{méca}$ par rapport aux combinaisons testées.

Tableau 34 Différences relatives de $P_{méca}$ (en %) des combinaisons testées par rapport à la combinaison référence Moa 2012

Combinaison Moa 2012	Combinaison Vermarc	Combinaison Bioracer 1 alvéolée	Combinaison Bioracer 2 lisse
Référence	+6,1%	+4,8%	+3,4%

Il a donc été décidé dans un premier temps de continuer à équiper nos coureurs avec cette combinaison Moa puisque B'twin ne proposait pas de produits équivalents dans leur gamme au début de notre collaboration.

3. Etude de l'influence de modifications de la surface du mannequin sur la traînée aérodynamique

Cette première étude visait à mieux comprendre l'influence de la surface d'une combinaison sur la pénétration dans l'air avec pour objectif de modifier l'écoulement du flux d'air autour du corps du mannequin (décrochage, traînée de pression...) afin de diminuer la traînée aérodynamique totale. Depuis plusieurs années, un grand nombre de questions portent sur les effets que peuvent avoir des modifications de la rugosité d'une combinaison sur l'aérodynamisme. Une précédente session en soufflerie avait montrée qu'une combinaison composée d'un certain nombre de coutures était ressortie plus performante, bien que le textile utilisé ne soit pas très technique. Il semble que les différentes coutures situées sur la surface

de la combinaison au niveau des bras, des épaules et du dos permettaient d'améliorer l'écoulement du flux d'air autour du corps. Dans ce sens, des études récentes ont montré que la rugosité du textile suivant l'endroit où il se situe sur la combinaison peut favoriser l'écoulement de la couche limite (Brownlie *et al.*, 2009 ; Chowdhury *et al.*, 2010 ; Moria *et al.*, 2012) pour diminuer la traînée aérodynamique.

A partir de l'étude CFD réalisée pour le développement du cadre de CLM, les forces de pression et de cisaillement appliquées sur le corps ont pu être analysées. Des phénomènes caractéristiques ont été mis en évidence notamment au niveau des bras. Les figures 130 et 131 montrent qu'il existe de fortes pressions appliquées sur les zones centrales du bras et des épaules, à l'endroit du bord d'attaque, ainsi que de fortes zones de cisaillements de part et d'autre du bras, en arrière des zones de fortes pressions. Ces forces de pression et de cisaillement mesurées grâce aux calculs CFD sont directement reliées aux traînées de pression et de frottement qui s'appliquent sur les bras dans l'écoulement de la couche limite. On peut également observer que la surface du dos est une surface sans fortes pressions mais avec des forces de cisaillements plus importantes au niveau des flans dans la continuité de l'écoulement provenant des bras et des épaules. C'est donc au niveau des bras et des épaules qu'il apparaît qu'il faille principalement intervenir pour optimiser l'écoulement de l'air. Ces observations vont dans le sens de celles réalisées par Brownlie *et al.* (2009) dans leurs études de R&D sur des combinaisons chez Nike. Les mesures en soufflerie devenant significativement plus précises et reproductibles avec l'utilisation du mannequin, de nombreux essais ont été réalisés en modifiant la rugosité avec différents formats de bandelettes et de fils au niveau des bras, des épaules mais également des cuisses, du dos et du casque. Les membres inférieurs et le bassin constituaient également des zones importantes de cisaillement mais l'étude CFD réalisée avec un mannequin immobile ne permettait pas de donner une véritable interprétation des phénomènes aérodynamiques réels avec des membres en mouvement.

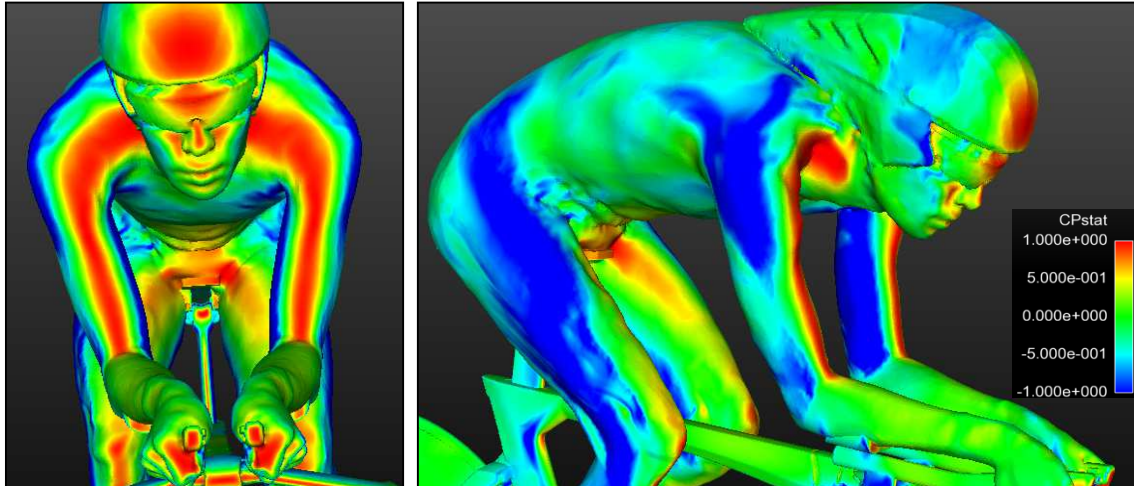


Figure 130 Illustrations de l'étude CFD mettant en évidence les forces de pression appliquées avec un vent de 50 km/h

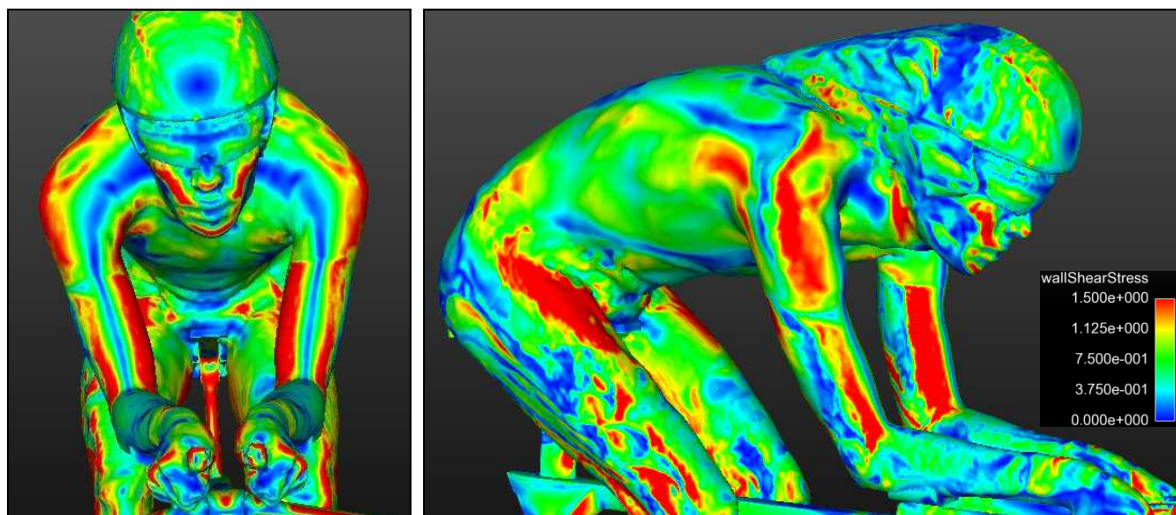


Figure 131 Illustrations de l'étude CFD mettant en évidence les forces de cisaillement sur le corps avec un vent de 50 km/h

Positions et matériels testés

Le tableau 35 présente les conditions expérimentales des essais en soufflerie de modifications de la surface du mannequin.

Tableau 35 Matériels et équipements pour les essais de modifications de la surface du mannequin




	Test avec mannequin
Protocole	n°2
Position	CLM
Casque	Uvex Race 6
Combinaison	sans
Couvre-chaussures	Moa CLM
Cadre	Lapierre Aerostorm 2012
Groupe	Shimano Di2 7900
Roues	Av : Shimano C50 Ar : Pro Textreme
Kit bidon	sans





Résultats

Le tableau 36 présente l'ensemble des essais qui ont été réalisés avec les différences moyennes de traînée totale en comparaison avec la traînée du mannequin nu.

Le résultat principal de cette étude montre qu'avec la pose d'un fil de pêche de 0,7 mm à l'intérieur et à l'extérieur du bras et de l'épaule, c'est-à-dire au niveau des tangentes des cylindres des bras (figure 133), la traînée aérodynamique totale était significativement diminuée de 4,4% (figure 132). Ces gains aérodynamiques sont considérables puisqu'ils équivalent à un gain chronométrique de 0,9 sec/km pour une même $P_{méca}$. Ce résultat est à mettre en lien avec les explications de Brownlie *et al.* (2009) qui ont montré qu'au niveau des bras, où la traînée de pression prédomine, une surface rugueuse a un impact sur l'écoulement de la couche limite et favorise la transition laminaire / turbulent de manière performante.

Tableau 36 Détails des essais de modifications de la surface du mannequin avec les différences de traînée aérodynamique en comparaison à la configuration de référence (mannequin nu)

Session	Matière utilisée	Endroits / positions	Illustrations	Δ (%) / référence
1	Bandelette papier zig-zag	Extérieur bras + épaules		-1,0%
2	Bandelette papier zig-zag	Extérieur bras + épaules (avancé de 1 cm / session 1)		-1,0%
3	Fil acier 1,5 mm	idem session 2		+3,2%
4	Fil de pêche 0,7 mm	idem session 2		-2,9%
5	Fil de pêche 0,7 mm	idem session 2 + intérieur bras		-4,4%
6	Fil de pêche 0,7 mm	casque		+0,5%
7	Fil de pêche 0,7 mm	Casque (avancé de 2 cm / session 6)		+0,4%
8	Fil de pêche 0,7 mm	Casque (reculé de 2 cm / session 6)		0,0%
9	Fil silicone 1,6 mm	Casque (idem session 8)		+0,2%

10	Fil de pêche 0,7 mm	Extérieur cuisse		+2,0%
11	Fil de pêche 0,7 mm	Dos : lignes en V partant des épaules vers lombaires		+1,0%
12	Fil de pêche 0,7 mm	Dos : lignes partant des épaules vers crêtes iliaques		+0,8%
13	Fil de pêche 0,7 mm	Dos : lignes en V partant des épaules vers milieu du dos		+0,7%

D'autres configurations ont été testées au niveau des bras. Une fine bandelette papier en forme de zigzag (session 1 et 2) apportait des gains sur la traînée de 1,0% alors qu'un fil plus épais (1,5 mm) dégradait l'aérodynamisme de 3%. D'autre part, les essais avec la pose de fils et de bandelettes au niveau du dos, du casque et des cuisses n'ont montré aucun gain significatif. Il convient donc d'être prudent avec ce procédé puisqu'un mauvais diamètre et un mauvais placement des bandelettes et/ou fils peuvent être néfastes d'un point de vue aérodynamique. Le nombre de Reynolds, qui correspond au rapport entre la largeur du grain de la rugosité (épaisseur du fil) et le diamètre du cylindre selon la vitesse de l'écoulement, explique ce phénomène puisqu'il influence la transition de l'écoulement d'une manière positive ou négative.

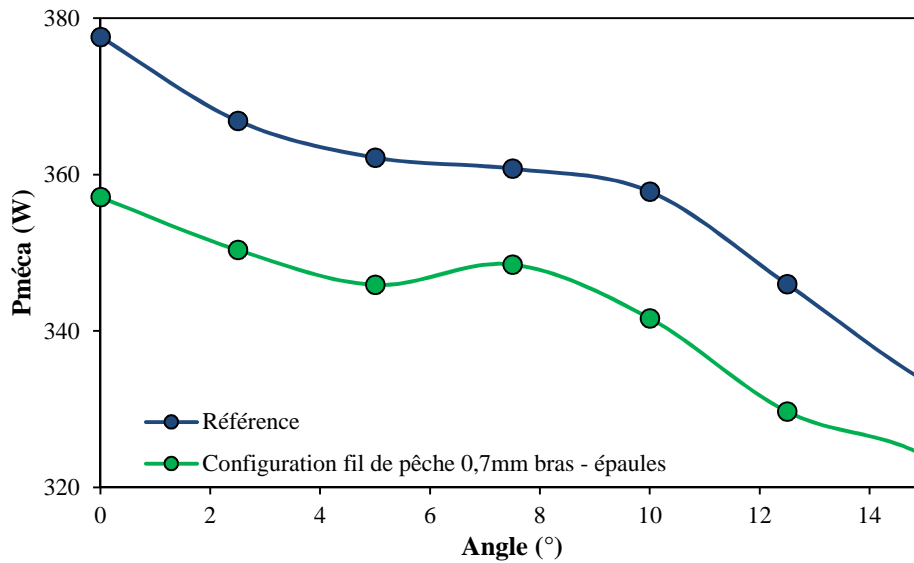


Figure 132 Relations $P_{méca}$ – angle de vent à 50 km/h du mannequin nu et du mannequin avec le fil 0,7mm posé à l'intérieur à l'extérieur des bras et des épaules

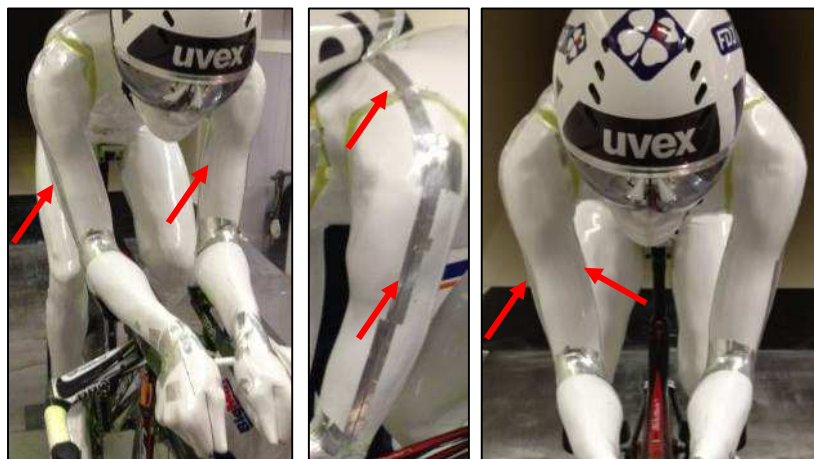


Figure 133 Configuration apportant les gains aérodynamiques les plus significatifs (4,4%), flèches rouges délimitant la position du fil de pêche

Afin de mieux interpréter les résultats obtenus, nous avons utilisé la technique de visualisation des écoulements pariétaux (figures 134 et 135). Le but recherché avec l'ajout d'un petit fil au niveau des bras et des épaules était de modifier l'écoulement de l'air pour modifier artificiellement la transition laminaire / turbulent dans la couche limite, de la même manière que Brownlie *et al.* (2009) l'ont réalisé avec un textile entièrement rugueux. La petite proéminence créait une turbulence en amont de l'endroit où elle avait initialement lieu ce qui avait pour effet de modifier l'endroit où avait lieu le décrochage de l'air. Cela avait pour effet de repousser vers l'arrière l'endroit du décrochage. La figure 134 montre la protubérance du

fil de pêche qui permet d'accélérer l'écoulement à son aval et de diminuer l'ampleur de la turbulence à l'arrière du bras. D'une certaine manière, le fil permet de réorganiser la turbulence du flux d'air, en améliorant la pénétration dans l'air du corps et donc de l'ensemble cycliste - vélo. Des tubérosités sur les ailes d'avion sont présentes pour rechercher le même but.

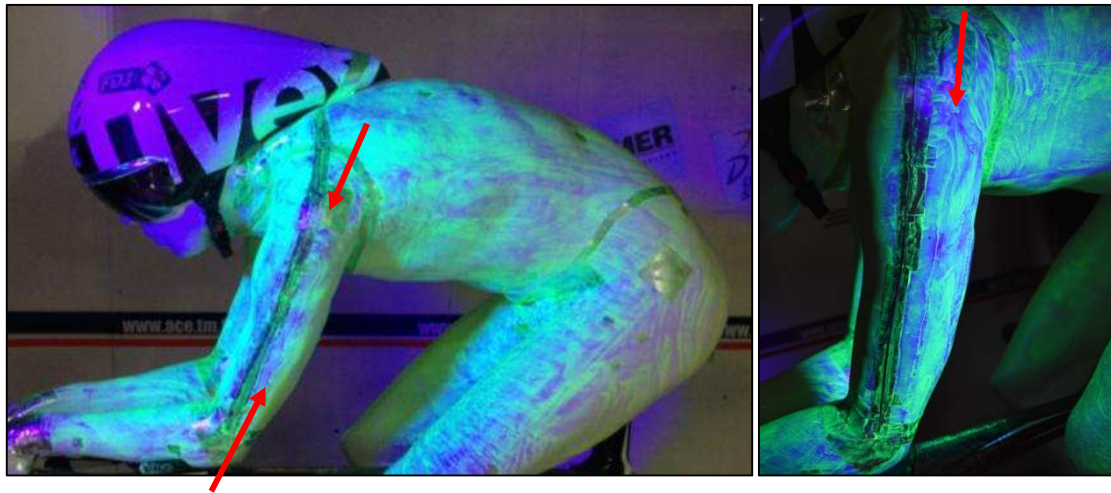


Figure 134 Lignes de frottement mises en évidence par la méthode de visualisation pariétale



Figure 135 Visualisation des écoulements pariétaux sur le casque, le dos et le flanc

L'étape consistait à pouvoir reproduire l'effet positif de pénétration dans l'air observé en soufflerie en conditions réelles de locomotion sur vélodrome avec des coureurs.

4. Test expérimental sur vélodrome visant à diminuer la traînée des bras

Avant d'entreprendre des modifications sur la combinaison, il était important de se référer au règlement UCI pour connaître les limites de notre intervention. Voici ce que dit l'article 1.3.033 du règlement UCI :

L'équipement vestimentaire ne peut pas être adapté pour le détourner de son usage purement vestimentaire et il est interdit d'y ajouter tout élément ou dispositif non essentiel. Il est interdit de porter des vêtements ou des combinaisons moulantes auxquels ont été ajoutés des éléments non essentielles destinés à améliorer les propriétés aérodynamiques, comme par exemple des ailettes sous les bras ou un prolongement entre le casque et le maillot ou la combinaison. Les vêtements doivent impérativement suivre le contour du corps du cycliste. L'équipement vestimentaire ne peut être fabriqué qu'à partir d'un « matériau textile » composé de fibres ou de fils dont la structure est celle d'un « tissu » avec des mailles ouvertes. Aucun traitement de surface pour « fermer les mailles » ou revêtement n'est permis, sauf pour les logos et les labels.

Cette première session sur vélodrome avait pour but de retrouver le même phénomène aérodynamique qu'observé en soufflerie sur le mannequin en plaçant des fils de fer fin (1,1 mm et 1,5 mm) sur la combinaison des cyclistes au niveau des bras (figure 136). Si les essais s'avéraient concluants, l'idée serait de remplacer les fils de fer par des coutures sur la combinaison afin de rester dans les limites du règlement.



Figure 136 Illustrations de la pose des fils à l'intérieur et à l'extérieur des bras

Positions et matériels testés

Le tableau 37 présente les conditions expérimentales des essais sur vélodrome avec les deux cyclistes.

Tableau 37 Matériels et équipements pour les essais de modifications de la surface de la combinaison sur des cyclistes

	Test n°1 : JR	Test n°2 : ML
Position	CLM	CLM
Casque	Uvex Race 6	Uvex Race 6
Combinaison	BTwin 2013	BTwin 2013
Couvre-chaussures	Moa CLM	Moa CLM
Cadre	Lapierre Aerostorm 2013	Lapierre Aerostorm 2013
Groupe	Shimano Di2 9000	Shimano Di2 9000
Roues	Av : Shimano C50 Ar : Pro Textreme	Av : Shimano C50 Ar : Pro Textreme
Kit bidon	sans	sans

Résultats

Pour rappel, ces essais sur vélodrome faisaient suite à ceux réalisés en soufflerie avec le mannequin qui montraient des gains aérodynamiques moyens de 4,4% avec la pose de fils de 0,7 mm à l'extérieur et à l'intérieur du bras. Il s'agissait donc d'essayer de reproduire ce phénomène en conditions réelles sur vélodrome avec des cyclistes. Il était beaucoup plus difficile de reproduire la même proéminence sur la surface de la combinaison portée par un cycliste en plaçant les fils aux bons endroits au niveau des tangentes des cylindres de chaque bras, que sur la surface du mannequin.

Les premiers essais en conditions réelles ont montré des résultats significatifs mais contraire à ceux obtenus précédemment en soufflerie (tableau 38). En effet, si la pose des fils de 1,5 mm dégradait très nettement la pénétration dans l'air de JR, il convient de relever leur effet réel puisque plus la vitesse était élevée et plus leur effet s'estompait (+7,5% à 40 km/h contre +4,3% à 50 km/h). Inversement, les résultats obtenus avec ML montrent des légers gains aérodynamiques avec des vitesses inférieures à 40 km/h (-0,6% avec un fil de 1,1 mm à 40 km/h). En revanche, plus la vitesse s'élevait, plus la pénétration dans l'air se dégradait (+5,0% avec un fil de 1,1 mm et +6,4% avec un fil de 1,5 mm à 50 km/h) (figures 137 et 138).

Manifestement, l'influence du diamètre du fil joue un rôle important sur la traînée aérodynamique puisqu'il modifie les caractéristiques du nombre de Reynolds en fonction du morphotype du coureur. Ainsi, le diamètre du fil et sa position le long des bras constitue une procédure extrêmement compliquée à mettre en place pour un grand nombre de coureurs. En revanche, la technique montrant de possibles gains aérodynamiques mesurés en soufflerie, elle pourrait être développée dans un proche avenir sur le leader d'une équipe.

Tableau 38 Différences relatives de $P_{méca}$ avec les modifications sur la combinaison par rapport à la condition de référence

	ML (fils 1,1 mm)	ML (fils 1,5 mm)	JR (fils 1,5 mm)
40 km/h	-0,6%	+1,1%	+7,5%
45 km/h	+2,3%	+3,9%	+5,8%
50 km/h	+5,0%	+6,4%	+4,3%

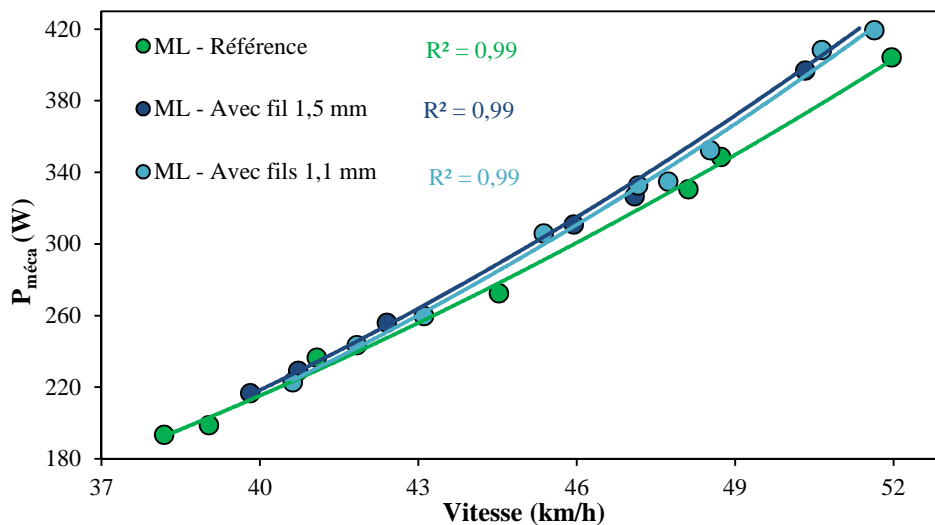


Figure 137 Relations $P_{méca}$ – vitesse de ML sur vélodrome des essais de modifications de la surface de la combinaison

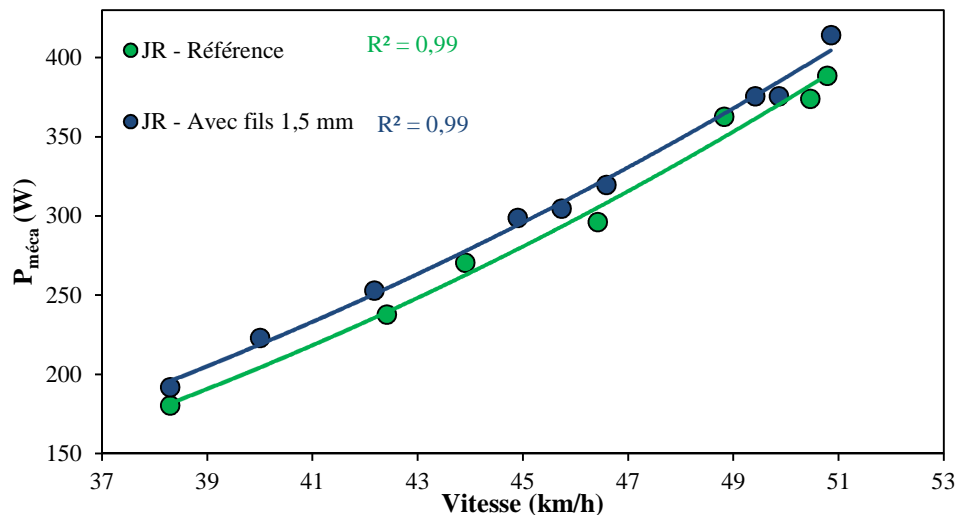


Figure 138 Relations $P_{méca}$ – vitesse de JR sur vélodrome des essais de modifications de la surface de la combinaison

Suite à cette première phase d'essai sur le terrain, il a été convenu avec B'twin de procéder d'une manière différente. Vu la complexité de cette démarche, des risques de dégradation de la pénétration dans l'air et des limites imposées par le règlement UCI, nous avons convenu qu'il était plus judicieux d'orienter les recherches sur l'optimisation de la matière du textile de la combinaison comme cela l'a été très bien montré dans l'étude de Brownlie *et al.* (2009) sur le développement des combinaisons Nike. Sur la base de cette étude, l'objectif a consisté à placer des textiles spéciaux, comportant des rainures ou une certaine rugosité, au niveau des bras et des épaules pour optimiser l'écoulement de la couche limite autour du corps du cycliste et ainsi diminuer la traînée.

La phase de recherche suivante a été d'organiser une nouvelle session en soufflerie où le but était d'habiller le mannequin parties par parties avec 1) différents textiles techniques procurés par B'twin se rapprochant des caractéristiques des textiles utilisés par Brownlie *et al.* (2009) et 2) des textiles permettant de reproduire l'effet aérodynamique positif observé avec des fils positionnés sur les bras et les épaules.

5. Etude comparative sur vélodrome entre la combinaison Moa et une combinaison B'twin (2013)

Quelques mois après la dernière session comparative en soufflerie, B'twin nous a proposé de tester une combinaison élaborée par un de leur fournisseur et utilisée par une équipe concurrente. Une session sur vélodrome a ainsi été organisée avec deux coureurs afin de comparer cette combinaison à la combinaison Moa de référence, précédemment validée. Cette combinaison B'twin était constituée d'un textile également très lisse mais plus épais. Elle était composée de manches mi-longues coupées au niveau du pli du coude. Son patronage était différent de celui de la combinaison Moa, avec des coutures également peu proéminente afin d'épouser au mieux les différentes parties du corps des cyclistes, et éviter les plis.

Positions et matériels testés

Le tableau 39 présente les conditions expérimentales des essais sur vélodrome de combinaisons avec deux cyclistes de l'équipe FDJ.

Tableau 39 Matériels et équipements pour les essais de combinaisons

	Test n°1 : JR	Test n°2 : ML
Position	CLM	CLM
Casque	Uvex Race 6	Uvex Race 6
Combinaison	Moa 2012 / BTwin 2013	Moa 2012 / BTwin 2013
Couvre-chaussures	Moa CLM	Moa CLM
Cadre	Lapierre Aerostorm 2013	Lapierre Aerostorm 2013
Groupe	Shimano Di2 9000	Shimano Di2 9000
Roues	Av : Shimano C50 Ar : Pro Textreme	Av : Shimano C50 Ar : Pro Textreme
Kit bidon	sans	sans

Résultats

Les résultats montrent que la combinaison B'twin était plus performante d'un point de vue aérodynamique que la combinaison Moa (figures 139 et 140). Les gains aérodynamiques étaient très intéressants : de -4,2% à -3,1% entre 40 et 50 km/h sur ML et de -1,8% à -0,9% entre 40 et 50 km/h sur JR (tableau 40). Les gains étaient variables entre JR et ML. Une explication est possible en observant la figure 141. La combinaison moule beaucoup mieux ML alors qu'on observe de nombreux plis au niveau des bras et des épaules sur JR. Comme Brownlie *et al.* (2009) l'ont expliqué, plus une combinaison moule le corps du cycliste et moins il y a de plis, plus la combinaison diminue la traînée aérodynamique totale de l'ensemble cycliste – vélo. Le textile et/ou le patronage de cette combinaison semblent donc améliorer significativement la pénétration dans l'air par rapport à la combinaison Moa. Néanmoins, pour optimiser les gains, il semble nécessaire de réaliser des combinaisons sur-mesure.

Tableau 40 Différences relatives de $P_{méca}$ avec la combinaison B'twin par rapport à la combinaison Moa

	ML	JR
40 km/h	-4,2%	-1,8%
45 km/h	-3,6%	-1,3%
50 km/h	-3,1%	-0,9%

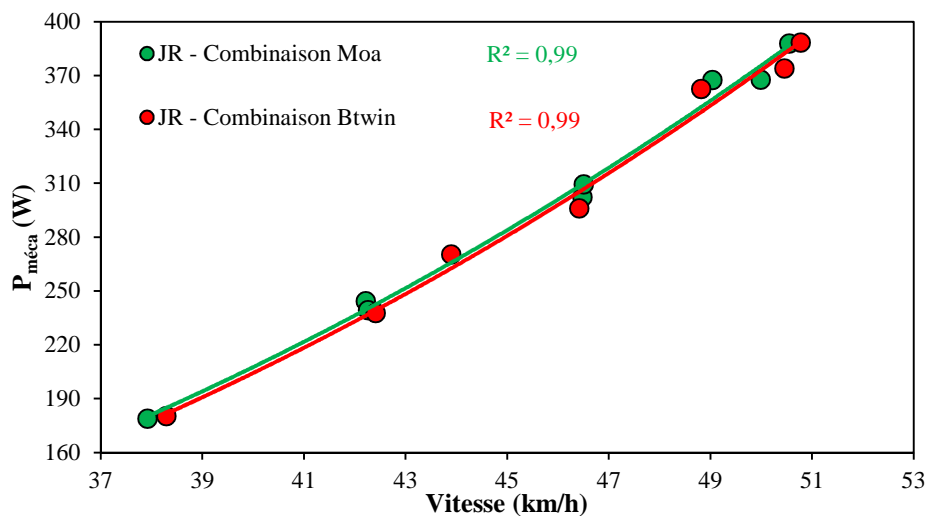


Figure 139 Relations $P_{méca}$ – vitesse de JR sur vélodrome des essais des combinaisons Moa et Btwin

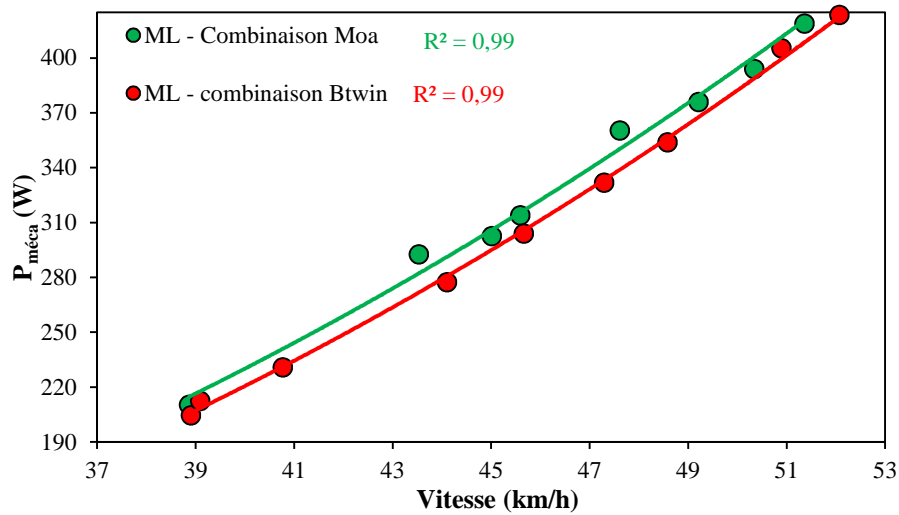


Figure 140 Relations $P_{méca}$ – vitesse de ML sur vélodrome des essais des combinaisons Moa et Btwin

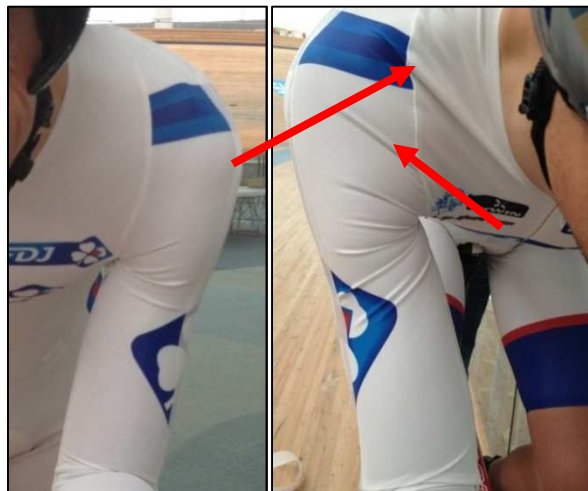


Figure 141 Visualisation de la combinaison B'twin sur ML (à gauche) et JR (à droite). Les flèches rouges mettent en évidence les plis au niveau des articulations sur JR.

Suite à cette session d'essais, il a été convenu d'équiper les cyclistes avec cette nouvelle combinaison pour la suite de la saison 2013. Toutefois, il a été demandé à B'twin d'en améliorer le patronage afin d'éviter au maximum les plis au niveau des bras et des épaules.

6. Etude comparative en soufflerie de combinaisons Moa et B'twin

Un an après la session d'essai sur vélodrome, B'twin nous a proposé plusieurs autres nouveaux modèles de combinaisons. Certains avaient la particularité de posséder de nouvelles propriétés de textiles ainsi qu'un modèle avec fermeture-éclair dans le dos, permettant d'améliorer la tenue de la combinaison sur le corps du cycliste. Une étude comparative a été organisée avec un coureur pour tester ces différentes combinaisons.

Positions et matériels testés

Le tableau 41 présente les conditions expérimentales des essais en soufflerie de combinaisons.

Tableau 41 Matériels et équipements pour les essais de combinaisons en soufflerie

	Test avec GS
Protocole	n°1
Position	CLM
Casque	Uvex Race 6
Combinaison	Essais de différents modèles Moa et B'twin
Couvre-chaussures	Moa CLM
Cadre	Lapierre Aerostorm 2013
Groupe	Shimano Di2 9000
Roues	Av : Shimano C50 Ar : Pro Textreme
Kit bidon	sans

La combinaison Moa manches courtes a été prise une nouvelle fois comme combinaison de référence puisque lors des dernières sessions en soufflerie elle était la plus performante.

Le tableau 42 présente le détail des différentes combinaisons testées par GS.

Tableau 42 Détail des essais et des combinaisons testées

Essai n°	Marque	Année	Rugosité textile	Coloris	Manches	Zipp
1 (Référence)	Moa	2012	Ultra-lisse	FDJ-Bigmat	courtes	avant
2	B'twin	2013	Lisse – plus épais	FDJ.fr	mi-longues	avant
3	B'twin	2013	Lisse – plus épais – non sublimé	blanc	mi-longues	avant
4	B'twin	2014	Rainurés	FDJ.fr	mi-longues	avant
5	Proto	2013	Lisse – non sublimé (T.Martin)	blanc	mi-longues	dos
6	Moa	2012	Ultra-lisse	FDJ-Bigmat	longues	avant
7	Moa	2012	Ultra-lisse	FDJ-Bigmat	mi-longues	avant
8	B'twin	2014	Rainurés (col allongé)	FDJ.fr	mi-longues	avant

Résultats

Le tableau 43 présente les écarts moyens (en %) et les gains/pertes chronométriques entre les différentes combinaisons par rapport à la combinaison de référence Moa 2012.

Les différents essais de combinaisons montrent des résultats très significatifs entre les différentes combinaisons. La combinaison Moa 2012 composée avec un textile très lisse et déperlant était la combinaison la plus performante d'un point de vue aérodynamique dans sa configuration manches courtes, et ce, malgré les nombreux plis au niveau des épaules (figure 142). Comme précédemment observé lors des premiers essais avec cette combinaison en soufflerie, les manches longues dégradent la pénétration dans l'air, principalement avec un vent de face (+3,2 et +3,7%). Il est intéressant de noter qu'avec un angle de vent de 20°, la longueur des manches n'a plus d'effet sur la traînée aérodynamique ($\pm 0,2\%$). Il semble donc que le petit décollement au bord de chaque manche (figure 142 à droite) soit responsable des nets gains aérodynamiques mesurés avec vent de face. Nous pourrions faire le parallèle entre ce phénomène et les précédents essais réalisés en soufflerie où nous avons amélioré de 4,4% la pénétration dans l'air totale du mannequin en disposant des fils de 0,7 mm de chaque côté des bras. Ainsi, le petit décollement de la manche aurait pour effet de favoriser avec vent de face l'écoulement du flux d'air dans la couche limite autour des bras et dans son prolongement. La zone des bras semble donc être prépondérante dans la capacité d'une combinaison à être performante au niveau aérodynamique.

Tableau 43 Différences relatives de $P_{méca}$ (en %) et gains/pertes chronométriques entre les différentes combinaisons par rapport à la combinaison de référence Moa 2012

	Angle 0°	Angle 20°	Moyenne globale	Ecart chronométrique moyen
Essai 1 (Moa 2012 m.c.)	Réf.	Réf.	Réf.	Réf.
Essai 2 (B'twin 2013)	+8,0%	+2,0%	+5,0%	+1,2 sec/km
Essai 3 (B'twin 2013 non sublimé)	+6,1%	+1,3%	+3,7%	+0,9 sec/km
Essai 4 (B'twin 2014)	+2,8%	+1,8%	+2,3%	+0,6 sec/km
Essai 5 (Proto zipp dos)	+3,3%	+3,4%,	+3,3%	+0,8 sec/km
Essai 6 (Moa 2012 m.l.)	+3,2%	-0,2%	+1,5%	+0,4 sec/km
Essai 7 (Moa 2012 m.m-l.)	+3,7%	+0,2%	+1,9%	+0,5 sec/km
Essai 8 (B'twin 2014 – col allongé)	+3,1%	-1,9%	+0,6%	+0,2 sec/km



Figure 142 Combinaison Moa manches courtes

La combinaison B'twin 2013 validée il y a un an sur vélodrome ne semblait pas être aussi performante comparativement aux mesures initiales (entre 0,9 et 4,2% de gains de $P_{méca}$ suivant la vitesse et le coureur). En effet, cette combinaison dégradait la traînée aérodynamique entre 3,7 et 5,0% comparé à la combinaison de référence selon que le textile soit sublimé ou non (procédé d'impression). Ces écarts atteignaient même entre 6,1 et 8,0% dans les conditions de vent de face. Il convient de noter que le port de cette combinaison par GS présentait également certains plis au niveau des bras et des épaules (figure 143). Cette matière moins lisse et non-imperméable semble donc moins efficace au niveau

aérodynamique puisque le port de cette combinaison entraîne des pertes chronométriques proches de 1 sec/km.



Figure 143 Combinaison B'twin 2013

La combinaison prototype B'twin 2014 était moins performante que la combinaison de référence (+2,3%). En revanche, elle était relativement proche des combinaisons Moa dotées de manches mi-longues ou longues (moins de 1% de différence). D'autre part, cette combinaison B'twin 2014 était plus performante que la combinaison B'twin 2013 (-2,5%), surtout en présence de vent de face (-4,8%). Il convient de souligner que le patronage de cette combinaison au niveau des bras et des épaules est bien meilleur puisqu'elle ne présente aucun pli lorsqu'elle est portée par GS (figure 144), comme il l'a déjà constaté par Brownlie *et al.* (2009). Néanmoins, on observe une entrée d'air derrière le casque qui semble dégrader la pénétration dans l'air avec des vents de côté. En effet, en rallongeant l'encolure (figure 144 à droite), la traînée aérodynamique est diminuée de 3,6% avec des vents de côté, ce qui en fait la combinaison la plus performante avec ce type de vents. Ce résultat va dans le sens de l'étude de Underwood *et al.* (2011) qui avaient montré qu'un bon ajustement de la combinaison avec des coutures placées dans le sens de l'écoulement et sans plis sur la surface du corps, permettait d'améliorer significativement la pénétration dans l'air du cycliste. De manière globale, la combinaison B'twin avec le col allongé est celle qui se rapproche le plus de la combinaison de référence avec une différence non significative de +0,6%.

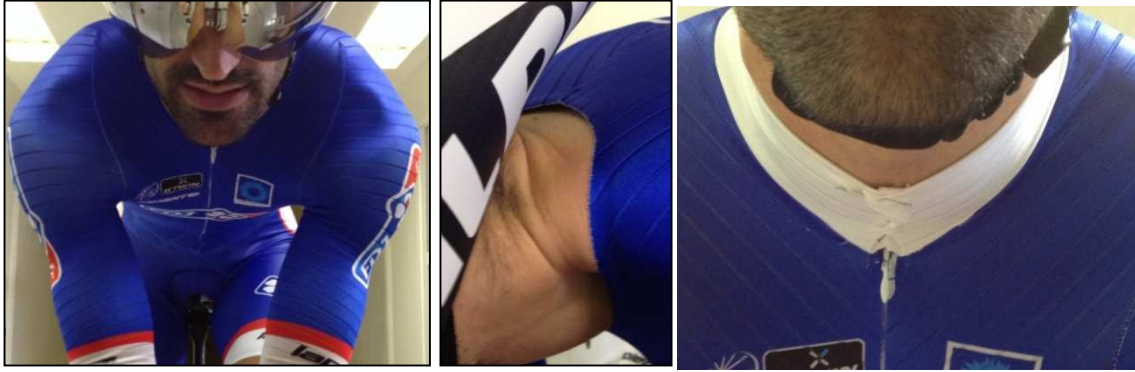


Figure 144 Combinaison prototype B'twin 2014. Au milieu : creux au niveau de la nuque. A droite : allongement de l'encolure.

Enfin, il est intéressant de remarquer que l'effet de la fermeture-éclair dans le dos a pour effet de dégrader très nettement la pénétration dans l'air avec des vents de côté puisque la combinaison prototype testée avec le zipp dans le dos était la moins performance dans ces conditions (+3,4%).



Figure 145 Combinaison prototype B'twin avec zipp dans le dos

7. Etude en soufflerie de l'influence sur la traînée aérodynamique de différents textiles selon leur emplacement sur le corps du mannequin

L'objectif de cette étude a été de tester différents textiles positionnés à certains endroits sur le corps du mannequin pour tenter d'améliorer la pénétration dans l'air de la combinaison. Comme suggéré par les études de Brownlie *et al.* (2009) et de Underwood *et al.* (2011), la disposition de textiles aux rugosités différentes à certains endroits spécifiques sur la combinaison permet de diminuer la traînée aérodynamique. Par exemple aux endroits où l'écoulement de l'air est transversal et exerce de fortes pressions, comme c'est le cas au niveau des bras et des épaules (cf. étude CFD), un textile rugueux peut avoir une influence positive sur l'écoulement de la couche limite, notamment en modifiant la transition entre l'écoulement laminaire et turbulent. A d'autres endroits où l'écoulement est majoritairement laminaire le long des surfaces, comme c'est le cas au niveau des avant-bras et du dos, un textile lisse serait plus approprié. Nous avons donc essayé de retrouver ces phénomènes en testant les différents textiles en notre possession à différents endroits du corps du mannequin. Le tableau 44 présente le détail des différents essais réalisés. Le mannequin « nu » a été considéré comme la mesure de référence. Ainsi, tout ajout de textile sur son corps était considéré comme une nouvelle condition expérimentale à tester.

Tableau 44 Détail des textiles et de leurs emplacements lors de chaque essai

Essai n°	Bras	Epaules	Dos	Ajout
1 (Réf.)	-	-	-	-
2	Moa 2012	Moa 2012	-	-
3	Moa 2012	Moa 2012	-	Ziz-zag intérieur + extérieur bras
4	Moa 2012	Moa 2012	-	Zig-zag arrière bras
5	B'twin 2014 (rainures horizontales)	B'twin 2014 (rainures horizontales)	-	-
6	B'twin 2014 (rainures horizontales)	B'twin 2014 (rainures horizontales)	-	Ziz-zag intérieur + extérieur bras
7	B'twin 2014 (rainures verticales)	B'twin 2014 (rainures verticales)	-	-
8	B'twin 2014 (rainures verticales)	B'twin 2014 (rainures verticales)	-	Ziz-zag intérieur + extérieur bras
9	B'twin 2014 (rainures verticales)	B'twin 2014 (rainures verticales)	B'twin 2014 (rainures sens écoulement)	-
10	B'twin 2014 (rainures verticales)	B'twin 2014 (rainures verticales)	Moa 2012	-

Résultats

Le tableau 45 présente les écarts moyens et les gains/pertes chronométriques entre les différents essais de positionnement de textiles sur la surface du mannequin.

Tableau 45 Différences relatives de $P_{méca}$ (en %) et gains/pertes chronométriques entre les différentes essais par rapport à la condition de référence (mannequin nu).

	Angle 0°	Angle 20°	Moyenne globale	Ecart chronométrique
Essai 1 (mannequin nu)	Réf.	Réf.	Réf.	Réf.
Essai 2 (bras – épaules : Moa)	+0,3%	-0,6%	-0,2%	-0,0 sec/km
Essai 3 (bras – épaules : Moa + zig-zag)	-2,4%	-3,8%	-3,1%	-0,7 sec/km
Essai 4 (bras – épaules : Moa + zig-zag arrière du bras)	+0,2%	-1,0%	-0,4%	-0,1 sec/km
Essai 5 (bras – épaules : B'twin r. horiz.)	-0,7%	-5,2%	-2,9%	-0,7 sec/km
Essai 6 (bras – épaules : B'twin r. horiz. + zig-zag)	-2,5%	-4,2%	-3,3%	-0,8 sec/km
Essai 7 (bras – épaules : B'twin r. vert.)	-1,8%	-5,7%	-3,8%	-0,9 sec/km
Essai 8 (bras – épaules : B'twin r. vert. + zig-zag)	-2,4%	-2,7%	-2,6%	-0,6 sec/km
Essai 9 (bras – épaules : B'twin r. vert. + dos : B'twin)	-0,9%	-4,4%	-2,9%	-0,7 sec/km
Essai 10 (bras – épaules : B'twin r. vert. + dos : Moa)	-1,2%	-5,8%	-3,5%	-0,8 sec/km

Les premiers essais portés sur la zone des bras et des épaules montrent qu'à cet endroit, un textile lisse n'apporte pas de gains significatifs au niveau aérodynamique. Par contre, lorsqu'on ajoute à l'intérieur et à l'extérieur des bras et des épaules (au même endroit que les précédents essais avec le fil de 0,7mm) une bandelette zigzag (figure 146), on améliore très nettement la pénétration dans l'air (-3,1%). On provoque ainsi le même phénomène de modification de l'écoulement dans la couche limite que celui créé avec un fil de pêche de 0,7 mm directement sur le mannequin.



Figure 146 Textile ultra-lisse Moa au niveau des bras avec bandelettes zig-zag

Lorsqu'on place sur les bras et les épaules le textile B'twin rainuré dans le sens horizontal (figure 147), comme sur la combinaison validée lors de la dernière session de soufflerie, on diminue très nettement la traînée aérodynamique totale dans les conditions de vent de côté (-5,2%). En revanche, l'effet est plus restreint avec les vents de face (-0,7%). Notons, qu'en ajoutant la bandelette sous forme de zig-zag au niveau des bras et des épaules, on améliore très nettement l'aérodynamisme dans ces conditions vents de face (-2,5%).



Figure 147 Textile B'twin rainuré dans le sens horizontal avec bandelettes zig-zag

Lorsque le textile B'twin rainuré est disposé verticalement (figure 148), avec les rainures parallèles aux bandelettes zig-zag et fil de pêche des précédents essais, la pénétration dans l'air est systématiquement améliorée. Les résultats obtenus sont significativement positifs d'un point de vue aérodynamique puisque les gains sont de 1,8% avec les vents de face et atteignent 5,8% avec les vents à 20°. L'écart moyen est donc de 3,8%, ce qui équivaut à des

gains chronométriques de 0,9 sec/km. Par contre, l'ajout d'une bandelette zig-zag sur les bras n'a pas d'effets positifs dans cette configuration.



Figure 148 Textile B'twin rainuré dans le sens vertical

D'autres essais ont porté sur la partie du dos où les deux textiles Moa lisse et B'twin rainuré ont été testés (figure 149). La configuration la plus performante est celle où le textile lisse Moa est disposé dans le dos. La différence est négligeable avec des vents de face (-0,3%) mais elle est significative avec un vent de côté de 20° (-1,5%). De la même manière que pour un zipp dans le dos, il semble préférable d'avoir un textile totalement lisse dans le dos pour favoriser l'écoulement du flux d'air sur cette partie.



Figure 149 Essais des textiles B'twin rainuré (à gauche) et ultra-lisse Moa (à droite) dans le dos

En conclusion, la configuration apportant les gains aérodynamiques les plus importants est celle réunissant le textile B'twin rainuré dans le sens vertical au niveau des bras et des épaules et, le textile Moa ultra-lisse dans le dos (figure 150). Cette configuration diminue la traînée

aérodynamique totale de 3,5%, soit un gain chronométrique de 0,8 sec/km pour une même $P_{méca}$ développée.



Figure 150 Configuration offrant les meilleurs gains aérodynamiques avec textile rainuré dans le sens vertical au niveau des bras et des épaules, et textile ultra-lisse Moa dans le dos

Les résultats obtenus sont en accord avec nos attentes puisque le textile rainuré dans le sens perpendiculaire à l'écoulement favorise l'écoulement du flux d'air aux endroits de fortes traînées de pression (bras – épaules) alors que le textile lisse l'améliore aux endroits de fortes traînées de frottement (dos). Suite à ces essais, il a ainsi été validé avec B'twin de réaliser une combinaison avec le textile rainuré dans le sens vertical au niveau des manches et des épaules, le textile lisse Moa au niveau du dos et également au niveau du cuissard. A ce niveau, il n'a pas été possible de tester l'influence du textile étant donné que le mannequin est immobile. Mais sur la base des résultats des essais de combinaisons réalisés précédemment avec GS et des conclusions de l'article de Brownlie *et al.* (2009), il apparaît préférable d'avoir un textile lisse sur cette partie en mouvement lors du pédalage. En ce qui concerne le patronage, la base sera celle de la combinaison B'twin 2014 précédemment testée en soufflerie qui s'ajuste bien au corps sans provoquer de plis et qui possède des coutures dans le sens de l'écoulement de l'air. L'encolure sera par contre légèrement remontée vu les gains aérodynamiques obtenus, afin d'éviter une entrée d'air au niveau de la nuque.

8. Validation en soufflerie de la combinaison prototype B'twin

A la suite des essais en soufflerie de positionnement de différents textiles sur le mannequin, B'twin a conçu une combinaison prototype à partir du cahier des charges établi. Le délai de fabrication étant restreint afin de permettre aux coureurs d'utiliser une combinaison plus performante pour les championnats de France CLM et le Tour de France 2014, il n'a pas été possible pour B'twin de se procurer le textile lisse Moa qui devait composer la partie dorsale. Cette première combinaison comporte donc le textile rainuré dans le sens de l'écoulement au niveau du dos. Comme les précédents essais l'ont montré, la différence de textile à cet endroit est surtout significative avec des vents de côté alors qu'il n'existe pas de différence avec les vents de face. Cette combinaison prototype a donc été testée avec un cycliste puisque pour rappel, il n'est pas possible d'habiller complètement le mannequin avec une combinaison.

Positions et matériels testés

Le tableau 46 présente les conditions expérimentales des essais en soufflerie de combinaisons. Les combinaisons B'twin 2014, utilisé depuis le début de saison par les cyclistes, et la combinaison B'twin prototype ont été comparées (figure 151).

Tableau 46 Matériels et équipements pour les essais de combinaisons en soufflerie

	Test avec JP
Protocole	n°1
Position	CLM
Casque	Uvex Race 6
Combinaison	B'twin 2014 et B'twin prototype
Couvre-chaussures	Moa CLM
Cadre	Lapierre Aerostorm 2013
Groupe	Shimano Di2 9000
Roues	Av : Shimano C50 Ar : Pro Textreme
Kit bidon	sans



Figure 151 Combinaisons B'twin 2014 (à gauche) et prototype (à droite)

Résultats

Les résultats présentés dans le tableau 47 montre que la combinaison prototype B'twin était significativement plus performante de 1,0%, de manière globale dans les différentes conditions de vent, que la combinaison B'twin utilisé en début de saison 2014. Pour rappel, une précédente session avec un cycliste avait montré que la combinaison B'twin 2014 avec un col rallongé était légèrement moins performante de 0,6% par rapport à la combinaison de référence Moa manches courtes. Il semble donc que cette combinaison prototype soit la combinaison de CLM la plus performance testée en soufflerie au cours de ce travail de thèse. Il convient de rappeler que d'après les tests expérimentaux sur le mannequin, il soit encore possible de l'améliorer en plaçant le textile Moa lisse au niveau du dos, ce qui devrait être réalisé en vue de la saison 2015.

Tableau 47 Différences relatives de $P_{méca}$ entre les différentes conditions de kit bidon selon les conditions de vent

	Angle 0°	Angles 0 à 20°	Moyenne globale
Essai 1 : Combinaison B'twin 2014	Réf.	Réf.	Réf.
Essai 2 : Combinaison B'twin prototype	-1,0%	-0,9%	-1,0%

Toutefois, il est intéressant d'observer un phénomène aérodynamique particulier puisque cette combinaison était moins performante à une vitesse de 60 km/h quelque soit l'angle du vent. Comme la figure 152 le montre, la combinaison B'twin prototype augmente la traînée à 60 km/h comparé à la combinaison B'twin 2014 de 1,1% et 4,9% respectivement avec des angles

de vent de 0° et 10° . Par contre, à des vitesses de 40 et 50 km/h, la combinaison B'twin prototype diminue nettement la traînée aérodynamique puisque les écarts sont compris entre -2,0% et -4,5%, ce qui en fait la combinaison la plus performante à ces vitesses. Bien qu'il soit difficile de l'affirmer, il semble que le textile rainuré dans le dos puisse être une cause à ce phénomène observé à 60 km/h. En effet, comme nous l'avons précédemment observé et sur la base des études de Brownlie *et al.* (2009) et de Chowdhury *et al.* (2010), un textile lisse placé au niveau dos permet d'améliorer l'écoulement en diminuant la traînée de frottement.

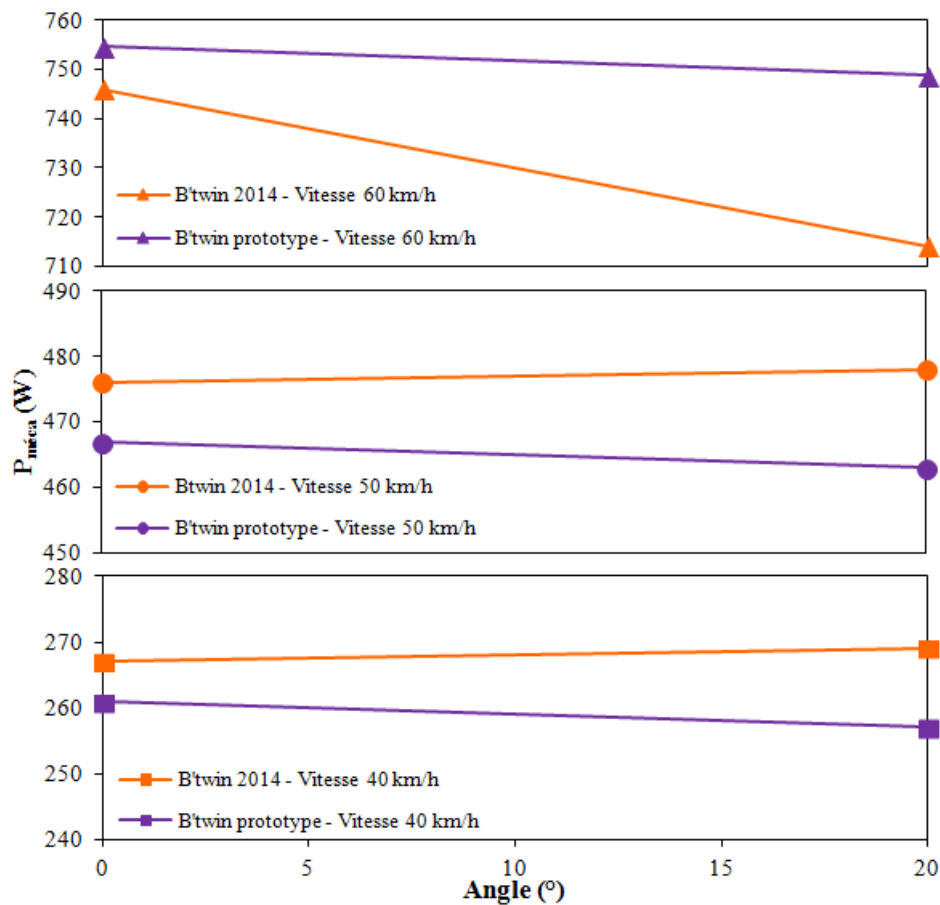


Figure 152 Relations $P_{méca}$ – angle du vent aux différentes vitesses des deux combinaisons B'twin

Cette combinaison prototype B'twin a par la suite été utilisée par les leaders de l'équipe cycliste FDJ lors de la fin de saison 2014. Il a été convenu que B'twin se procure le textile lisse Moa pour concevoir une nouvelle combinaison prototype avec ce textile au niveau du dos en vue de la saison 2015. Une session de validation en soufflerie et sur vélodrome sera prévue.

9. Conclusion

La collaboration avec nos deux partenaires textiles Moa puis B'twin a permis d'améliorer significativement de près de 3% la pénétration dans l'air du système cycliste – vélo avec de nouvelles combinaisons. Les recherches fondamentales effectuées sur le mannequin ont abouti à la création d'une combinaison performante et innovante dotée de textiles de différentes propriétés selon leur emplacement sur le corps. Ces études ont permis de mieux appréhender les phénomènes complexes de l'écoulement du flux d'air autour du cycliste et de perfectionner notre méthodologie de conception et d'évaluation de la combinaison sur la traînée aérodynamique.

DISCUSSION

Les projets de R&D conduits en collaboration avec les partenaires techniques de l'équipe FDJ ont permis de faire progresser l'ensemble cycliste – vélo – équipements sur la dimension aérodynamique. Les études expérimentales que nous avons mené ont été centrées sur la discipline du CLM où les performances des cyclistes de l'équipe FDJ ont été améliorées. La figure 153 illustre l'évolution de la performance aérodynamique du système homme – machine rapporté au leader de l'équipe (à travers l'amélioration de sa position mais surtout du matériel et des équipements utilisés) entre 2011 et 2014, c'est-à-dire entre le début et la fin de ce travail de thèse. Les gains aérodynamiques présentés correspondent aux gains moyens de $P_{méca}$ obtenus avec le matériel et les équipements qui ont été développés : le cadre, le kit bidon, la combinaison et le casque. Le casque aérodynamique de course en ligne a également fait l'œuvre d'un travail d'optimisation, notamment au bénéfice des sprinteurs. Il convient de rappeler que ces gains sont variables entre les cyclistes étant donné l'influence de la morphologie sur les traînées induites dues aux interactions entre le matériel, les équipements et le corps des cyclistes. Ces gains correspondent aux estimations moyennes et globales dans les différentes conditions expérimentales, mesurées dans les différentes études R&D. Comme nous l'avons observé notamment au cours du processus de développement du cadre CLM, les résultats ne convergeaient pas systématiquement dans le même sens en fonction de la technique utilisée. 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. Le tableau 48 résume les points forts et points faibles de chaque méthode, ainsi que les recommandations d'utilisation selon la phase de l'étude R&D. 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'étude comparative 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.

Les résultats des études de R&D montrent que les gains les plus importants ont été obtenus sur les équipements, c'est-à-dire avec le casque et la combinaison. Les améliorations obtenues sur le matériel, notamment sur le cadre (qui a constitué un important travail de recherche) sont plus minimes. Ce constat est à mettre en lien avec le fait qu'environ 2/3 de la traînée aérodynamique totale de l'ensemble homme - machine provient du corps du cycliste et seulement 1/3 du vélo (Kyle et Burke, 1984 ; Lukes *et al.*, 2005 ; Defraeye *et al.*, 2010a ; Underwood et Jermy, 2011). Au-delà de l'optimisation de la position, qui était généralement effectuée lors d'essais sur vélodrome (mais qui ne constituait pas le sujet de cette thèse), l'amélioration de la forme du casque et des propriétés du tissu de la combinaison autorisaient un meilleur écoulement du flux d'air autour du corps du cycliste et par conséquent, une diminution de la traînée aérodynamique totale. Concernant le matériel, il convient de trouver le bon compromis entre l'aérodynamisme, la rigidité, le poids et le pilotage. Au cours de ce travail de thèse, il n'a pas été possible de travailler sur l'ensemble du matériel composant le vélo, puisqu'il était relativement compliqué d'engager un travail de collaboration avec Shimano, fournisseur des roues et des périphériques.

L'expérience acquise au cours de ces trois années de recherches au niveau de l'optimisation de l'interface homme – machine m'a permis d'améliorer mes connaissances en terme d'aérodynamique et de mieux appréhender l'approche méthodologique de développement du matériel en cyclisme. Ainsi, ce travail ne s'arrête pas au terme de cette thèse et de nouveaux projets R&D sont déjà en cours afin de continuer à améliorer l'interface homme – machine. Pour y parvenir, il devient fondamental de travailler avec des partenaires techniques avec lesquels il est possible de collaborer pleinement. Les savoirs acquis à travers les différentes études qui ont été menées vont permettre d'orienter plus précisément les cahiers des charges relatifs au processus de développement des nouveaux composants matériels et équipements. Enfin, ce travail s'étant principalement attaché à l'étude des paramètres aérodynamiques de la performance de l'ensemble cycliste – vélo, un travail sur la résistance au roulement des pneumatiques et des frictions dues aux pièces mécaniques en rotation devra également être mis en place pour aller chercher encore plus loin des diminutions de la résistance à l'avancement.

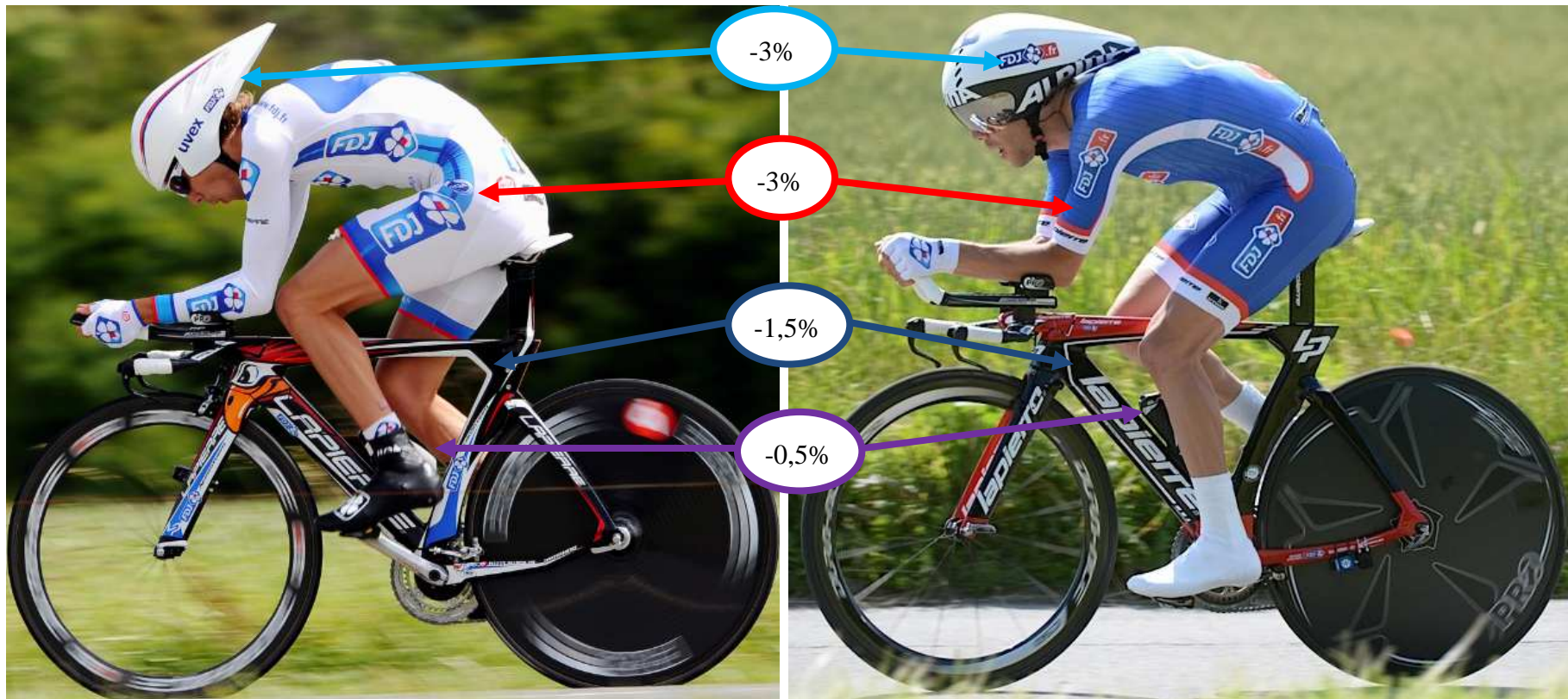


Figure 153 Résumé des gains aérodynamiques moyens obtenus avec l'amélioration du matériel et des équipements au cours de ce projet d'optimisation de la traînée aérodynamique totale du système cycliste - vélo

Tableau 48 Avantages, limites et recommandations de chacune des méthodologies utilisées dans ce travail de thèse

Méthodologies	Avantages	Limites	Recommandations
Soufflerie	<ul style="list-style-type: none"> - mesure direct du SC_x - grand nombre de protocoles possibles (choix de la vitesse et de l'angle de vent apparent) - rapidité de la mesure et des résultats - utilisation du mannequin pour avoir une répétabilité élevée entre les mesures 	<ul style="list-style-type: none"> - disponibilité de la soufflerie et des coureurs - répétabilité des mesures avec coureur qui pédale - biais de l'appareil de mesure avec vibrations (équilibrage des roues...), démontage mannequin et vélo - test de position avec cyclistes : pédalage différent des conditions réelles (vélo fixé, inertie...) - température fraîche à l'intérieure dans les saisons froides - coût très élevé 	<ul style="list-style-type: none"> - R&D matériel et équipement avec mannequin - test équipement et matériel avec mannequin - test équipement avec coureur
Modélisation numérique (CFD)	<ul style="list-style-type: none"> - analysée détaillée de la traînée aérodynamique des différents composants du système cycliste - vélo - analyse visuelle de l'écoulement du flux d'air - analyse visuelle des forces exercées sur la surface par la couche limite - rapidité des résultats dans un processus de développement (plus rapide que prototypage et essai en soufflerie) 	<ul style="list-style-type: none"> - complexité de la procédure de maillage - choix de la méthode de calcul - coût et délai importants - besoin important de ressources hardware, software et humaines - étude sur influence de la surface impossible 	<ul style="list-style-type: none"> - R&D matériel - analyse de l'écoulement de la couche limite
Conditions réelles (vélodrome)	<ul style="list-style-type: none"> - Conditions réelles de locomotion - idéal pour test d'optimisation de la position - Possibilité de passer un grand nombre de cyclistes en une journée - Coût relativement faible 	<ul style="list-style-type: none"> - habitude au pédalage sur piste - respect du protocole - conditions limitées aux vitesses entre 35 et 55 km/h et sans angle de vent - nombre d'essais limités par jour pour un cycliste car nécessite temps + effort physique - étalonnage et précision du capteur de puissance 	<ul style="list-style-type: none"> - test matériel et position avec coureur - phase de validation de projet R&D de matériel ou d'équipement

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

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

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

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

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

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

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

BIBLIOGRAPHIE

- Alam, F., Subic, A., & Akbarzadeh, A. (2008). Aerodynamics of Bicycle Helmets (P68) *The Engineering of Sport 7* (pp. 337-344): Springer Paris.
- Allen, H., & Coggan, A. R. (2010). *Training and Racing with a Power Meter*. Boulder, Colorado: VeloPress.
- Astrand, P. O., & Rodahl, K. (1970). *Textbook of work physiology*. New York: McGraw Hill.
- Avalos, M., Hellard, P., & Chatard, J.-C. (2003). Modeling the training-performance relationship using a mixed model in elite swimmers. *Medicine and science in sports and exercise*, 35(5), 838-846.
- Balmer, J., Davison, R. C., & Bird, S. R. (2000). Peak power predicts performance power during an outdoor 16.1-km cycling time trial. *Med Sci Sports Exerc*, 32(8), 1485-1490.
- Banister, E. W., & Hamilton, C. L. (1985). Variations in iron status with fatigue modelled from training in female distance runners. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 54(1), 16-23.
- Baron, B., Moullan, F., Deruelle, F., & Noakes, T. D. (2011). The role of emotions on pacing strategies and performance in middle and long duration sport events. *Br J Sports Med*, 45(6), 511-517. doi: 10.1136/bjism.2009.059964
- Barry, N., Burton, D., Crouch, T., Sheridan, J., & Luescher, R. (2012). Effect of crosswinds and wheel selection on the aerodynamic behavior of a cyclist. *Procedia Engineering*, 34(0), 20-25. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2012.04.005>
- Belli, A., Avela, J., & Komi, P. V. (1993). Mechanical energy assessment with different methods during running. *Int J Sports Med*, 14(5), 252-256. doi: 10.1055/s-2007-1021173
- Belli, A., Lacour, J. R., Komi, P. V., Candau, R., & Denis, C. (1995). Mechanical step variability during treadmill running. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 70(6), 510-517.
- Belli, A., Rey, S., Bonnefoy, R., & Lacour, J. R. (1992). A simple device for kinematic measurements of human movement. *Ergonomics*, 35(2), 177.
- Bentley, D. J., McNaughton, L. R., Thompson, D., Vleck, V. E., & Batterham, A. M. (2001). Peak power output, the lactate threshold, and time trial performance in cyclists. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 33(12), 2077-2081.
- Bergstrom, H. C., Housh, T. J., Zuniga, J. M., Traylor, D. A., Lewis, R. W., Camic, C. L., . . . Johnson, G. O. (2013a). Metabolic and neuromuscular responses at critical power from the 3-min all-out test. *Appl Physiol Nutr Metab*, 38(1), 7-13. doi: 10.1139/apnm-2012-0216
- Bergstrom, H. C., Housh, T. J., Zuniga, J. M., Traylor, D. A., Lewis, R. W., Camic, C. L., . . . Johnson, G. O. (2013b). Responses during exhaustive exercise at critical power

- determined from the 3-min all-out test. *J Sports Sci*, 31(5), 537-545. doi: 10.1080/02640414.2012.738925
- Bertucci, W., Betik, A., Duc, S., & Grappe, F. (2012). Gross efficiency and cycling economy are higher in the field as compared with on an Axiom stationary ergometer. *J Appl Biomech*, 28(6), 636-644.
- Bertucci, W., Duc, S., Villerius, V., & Grappe, F. (2005). Validity and reliability of the Axiom PowerTrain cycle ergometer when compared with an SRM powermeter. *Int J Sports Med*, 26(1), 59-65. doi: 10.1055/s-2004-817855
- Bertucci, W., Duc, S., Villerius, V., Pernin, J. N., & Grappe, F. (2005). Validity and reliability of the PowerTap mobile cycling powermeter when compared with the SRM Device. *Int J Sports Med*, 26(10), 868-873. doi: 10.1055/s-2005-837463
- Bertucci, W., Grappe, F., & Gros Lambert, A. (2007). Laboratory versus outdoor cycling conditions: differences in pedaling biomechanics. *J Appl Biomech*, 23(2), 87-92.
- Billat, V. (2001). L'apport de la science dans l'entraînement sportif: l'exemple de la course de fond. *STAPS*(1), 23-43.
- Billat, V. (2003). *Physiologie et méthodologie de l'entraînement: De la théorie à la pratique*: De Boeck Supérieur.
- Billat, V., Faina, M., Sardella, F., Marini, C., Fanton, F., Lupo, S., . . . Dalmonte, A. (1996). A comparison of time to exhaustion at VO₂ max in elite cyclists, kayak paddlers, swimmers and runners. *Ergonomics*, 39(2), 267-277. doi: 10.1080/00140139608964457
- Billat, V., & Koralsztein, J. P. (1996). Significance of the velocity at VO₂max and time to exhaustion at this velocity. *Sports Med*, 22(2), 90-108.
- Billat, V., Renoux, J. C., Pinoteau, J., Petit, B., & Koralsztein, J. P. (1994). Times to exhaustion at 100% of velocity at VO₂max and modelling of the time-limit/velocity relationship in elite long-distance runners. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 69(3), 271-273.
- Bini, R. R., & Diefenthaler, F. (2009). Mechanical work and coordinative pattern of cycling: a literature review. *Kinesiology*, 41(1), 25-39.
- Black, M. I., Durant, J., Jones, A. M., & Vanhatalo, A. (2014). Critical power derived from a 3-min all-out test predicts 16.1-km road time-trial performance. *Eur J Sport Sci*, 14(3), 217-223. doi: 10.1080/17461391.2013.810306
- Blair, K., & Sidelko, S. (2008). Aerodynamic Performance Of Cycling Time Trial Helmets (P76) *The Engineering of Sport 7* (pp. 371-377): Springer Paris.
- Blocken, B., Defraeye, T., Koninckx, E., Carmeliet, J., & Hespel, P. (2013). CFD simulations of the aerodynamic drag of two drafting cyclists. *Computers & Fluids*, 71, 435-445.
- Bocquet, V., & Billat, V. (1999). Modèles mathématiques et physiologiques de la performance humaine. *Science & Sports*, 14(6), 278-291. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0765-1597\(00\)86522-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0765-1597(00)86522-3)
- Borg, G. (1990). Psychophysical scaling with applications in physical work and the perception of exertion. *Scand J Work Environ Health*, 16 Suppl 1, 55-58.
- Bosquet, L., Leger, L., & Legros, P. (2002). Methods to determine aerobic endurance. *Sports Medicine*, 32(11), 675-700.

- Bourdin, M., Belli, A., Arzac, L. M., Bosco, C., & Lacour, J. R. (1995). Effect of vertical loading on energy cost and kinematics of running in trained male subjects. *J Appl Physiol*, 79(6), 2078-2085.
- Brooks, G. A., & Mercier, J. (1994). Balance of carbohydrate and lipid utilization during exercise: the "crossover" concept. *J Appl Physiol* (1985), 76(6), 2253-2261.
- Brownlie, L., Kyle, C., Carbo, J., Demarest, N., Harber, E., MacDonald, R., & Nordstrom, M. (2009). Streamlining the time trial apparel of cyclists: the Nike Swift Spin project. *Sports Technology*, 2(1-2), 53-60. doi: 10.1002/jst.12
- Brownlie, L., Ostafichuk, P., Tews, E., Muller, H., Briggs, E., & Franks, K. (2010). The wind-averaged aerodynamic drag of competitive time trial cycling helmets. *Procedia Engineering*, 2(2), 2419-2424. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2010.04.009>
- Burnley, M., Doust, J. H., & Vanhatalo, A. (2006). A 3-min all-out test to determine peak oxygen uptake and the maximal steady state. *Med Sci Sports Exerc*, 38(11), 1995-2003. doi: 10.1249/01.mss.0000232024.06114.a6
- Busso, T., & Chatagnon, M. (2008). Extension du modèle puissance–temps limite pour estimer la production d'énergie aérobie et anaérobie lors de l'exercice intense. *Science & Sports*, 23(5), 239-243. doi: 10.1016/j.scispo.2007.06.009
- Caldwell, G. E., Li, L., McCole, S. D., & Hagberg, J. M. (1998). Pedal and Crank Kinetics in Uphill Cycling. *J Appl Biomech*, 14, 245-259.
- Candau, R., Belli, A., Millet, G. Y., Georges, D., Barbier, B., & Rouillon, J. D. (1998). Energy cost and running mechanics during a treadmill run to voluntary exhaustion in humans. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 77(6), 479-485. doi: 10.1007/s004210050363
- Candau, R., Grappe, F., Menard, M., Barbier, B., Millet, G. Y., Hoffman, M. D., . . . Rouillon, J. D. (1999). Simplified deceleration method for assessment of resistive forces in cycling. *Med Sci Sports Exerc*, 31(10), 1441-1447.
- Capelli, C., Rosa, G., Butti, F., Ferretti, G., Veicsteinas, A., & di Prampero, P. E. (1993). Energy cost and efficiency of riding aerodynamic bicycles. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 67(2), 144-149.
- Cavagna, G. A. (1975). Force platforms as ergometers. *Journal of Applied Physiology*, 39(1), 174-179.
- Cazorla. (2001). *Tests de terrain pour évaluer l'aptitude aérobie et utilisation de leurs resultats dans l'entraînement*. Faculté des Sciences du Sport et de l'Education Physique, Université Victor Segalen Bordeaux 2. Bordeaux.
- Chabroux, V. (2010). *Approche aérodynamique et biomécanique de l'amélioration des performances de cyclistes en course contre la montre*. Université de la Méditerranée, Marseille.
- Chabroux, V., Barelle, C., & Favier, D. (2008). Aerodynamics of Time Trial Bicycle Helmets (P226). *The Engineering of Sport*, 7, 401-410. doi: 10.1007/978-2-287-09413-2_50
- Chabroux, V., Barelle, C., & Favier, D. (2011). Aerodynamics of Cyclist Posture, Bicycle and Helmet Characteristics in Time Trial Stage. *J Appl Biomech*.
- Chabroux, V., Mba, M. N., Sinton, P., & Favier, D. (2010). *Wake characteristics of time trial helmets using PIV-3C technique*. Paper presented at the 15th International Symposium to Laser Techniques to Fluid Mechanics.

- Chidnok, W., Dimenna, F. J., Bailey, S. J., Vanhatalo, A., Morton, R. H., Wilkerson, D. P., & Jones, A. M. (2012). Exercise tolerance in intermittent cycling: application of the critical power concept. *Med Sci Sports Exerc*, 44(5), 966-976. doi: 10.1249/MSS.0b013e31823ea28a
- Chidnok, W., Fulford, J., Bailey, S. J., Dimenna, F. J., Skiba, P. F., Vanhatalo, A., & Jones, A. M. (2013). Muscle metabolic determinants of exercise tolerance following exhaustion: relationship to the "critical power". *J Appl Physiol (1985)*, 115(2), 243-250. doi: 10.1152/jappphysiol.00334.2013
- Chowdhury, H., Alam, F., & Subic, A. (2010). Aerodynamic performance evaluation of sports textile. *Procedia Engineering*, 2(2), 2517-2522. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2010.04.025>
- Clarke, D. C., & Skiba, P. F. (2013). Rationale and resources for teaching the mathematical modeling of athletic training and performance. *Adv Physiol Educ*, 37(2), 134-152. doi: 10.1152/advan.00078.2011
- Costill, D., & Fox, E. (1969). Energetics of marathon running. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 1(2), 81-86.
- Coyle, E. F. (2005). Improved muscular efficiency displayed as Tour de France champion matures. *Journal of Applied Physiology*, 98(6), 2191-2196. doi: 10.1152/jappphysiol.00216.2005
- Coyle, E. F., Feltner, M. E., Kautz, S. A., Hamilton, M. T., Montain, S. J., Baylor, A. M., . . . Petrek, G. W. (1991). Physiological and biomechanical factors associated with elite endurance cycling performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 23(1), 93-107.
- Dahn, K., Mai, L., Poland, J., & Jenkins, C. (1991). Frictional Losses in Wheel Bearings. *Cycling Science*, 3, 28-32.
- Debraux, P., Bertucci, W., Manolova, A. V., Rogier, S., & Lodini, A. (2009). New Method to Estimate the Cycling Frontal Area. *Int J Sports Med*, 30(04), 266-272. doi: 10.1055/s-0028-1105940
- Debraux, P., Grappe, F., Manolova, A. V., & Bertucci, W. (2011). Aerodynamic drag in cycling: methods of assessment. *Sports Biomech*, 10(3), 197-218.
- Defraeye, T., Blocken, B., Koninckx, E., Hespel, P., & Carmeliet, J. (2010a). Aerodynamic study of different cyclist positions: CFD analysis and full-scale wind-tunnel tests. *J Biomech*, 43(7), 1262-1268. doi: 10.1016/j.jbiomech.2010.01.025
- Defraeye, T., Blocken, B., Koninckx, E., Hespel, P., & Carmeliet, J. (2010b). Computational fluid dynamics analysis of cyclist aerodynamics: Performance of different turbulence-modelling and boundary-layer modelling approaches. *Journal of biomechanics*, 43(12), 2281-2287.
- Defraeye, T., Blocken, B., Koninckx, E., Hespel, P., & Carmeliet, J. (2011a). Computational fluid dynamics analysis of drag and convective heat transfer of individual body segments for different cyclist positions. *J Biomech*, 44(9), 1695-1701.
- Defraeye, T., Blocken, B., Koninckx, E., Hespel, P., & Carmeliet, J. (2011b). Computational fluid dynamics analysis of drag and convective heat transfer of individual body segments for different cyclist positions. *Journal of biomechanics*, 44(9), 1695-1701.
- Defraeye, T., Blocken, B., Koninckx, E., Hespel, P., Verboven, P., Nicolai, B., & Carmeliet, J. (2013). Cyclist Drag in Team Pursuit: Influence of Cyclist Sequence, Stature, and

- Arm Spacing. *Journal of Biomechanical Engineering*, 136(1), 011005-011005. doi: 10.1115/1.4025792
- Dekerle, J., Baron, B., Dupont, L., Vanvelcenaher, J., & Pelayo, P. (2003). Maximal lactate steady state, respiratory compensation threshold and critical power. *European Journal of Applied Physiology*, 89(3-4), 281-288.
- Di Prampero, P. E., Atchou, G., Brückner, J.-C., & Moia, C. (1986). The energetics of endurance running. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 55(3), 259-266.
- Di Prampero, P. E., Cortili, G., Mognoni, P., & Saibene, F. (1979). Equation of motion of a cyclist. *Journal of Applied Physiology*, 47(1), 201-206.
- Duc, S., Bertucci, W., Pernin, J. N., & Grappe, F. (2008). Muscular activity during uphill cycling: effect of slope, posture, hand grip position and constrained bicycle lateral sways. *J Electromyogr Kinesiol*, 18(1), 116-127. doi: 10.1016/j.jelekin.2006.09.007
- Duc, S., Villerius, V., Bertucci, W., & Grappe, F. (2007). Validity and reproducibility of the ErgomoPro power meter compared with the SRM and Powertap power meters. *Int J Sports Physiol Perform*, 2(3), 270-281.
- Earnest, C. P., Wharton, R. P., Church, T. S., & Lucia, A. (2005). Reliability of the Lode Excalibur Sport Ergometer and applicability to Computrainer electromagnetically braked cycling training device. *J Strength Cond Res*, 19(2), 344-348. doi: 10.1519/R-15714.1
- Ebert, T. R., Martin, D. T., McDonald, W., Victor, J., Plummer, J., & Withers, R. T. (2005). Power output during women's World Cup road cycle racing. *Eur J Appl Physiol*, 95(5-6), 529-536. doi: 10.1007/s00421-005-0039-y
- Ebert, T. R., Martin, D. T., Stephens, B., & Withers, R. T. (2006). Power output during a professional men's road-cycling tour. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 1(4), 324-335.
- Emanuele, U., & Denoth, J. (2012). Influence of road incline and body position on power-cadence relationship in endurance cycling. *Eur J Appl Physiol*, 112(7), 2433-2441. doi: 10.1007/s00421-011-2213-8
- Ettema, G., & Loras, H. W. (2009). Efficiency in cycling: a review. *Eur J Appl Physiol*, 106(1), 1-14.
- Ettema, J. (1966). Limits of human performance and energy-production. *Internationale Zeitschrift für angewandte Physiologie einschließlich Arbeitsphysiologie*, 22(1), 45-54.
- Faina, M., Billat, V., Squadrone, R., De Angelis, M., Koralsztein, J. P., & Dal Monte, A. (1997). Anaerobic contribution to the time to exhaustion at the minimal exercise intensity at which maximal oxygen uptake occurs in elite cyclists, kayakists and swimmers. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 76(1), 13-20.
- Faria, E. W., Parker, D. L., & Faria, I. E. (2005). The science of cycling: physiology and training - part 1. *Sports Med*, 35(4), 285-312.
- Fenn, W. (1930). Work against the gravity and work due to velocity changes in running. *Am J Physiol*, 93, 433-462.
- Ferguson, C., Rossiter, H. B., Whipp, B. J., Cathcart, A. J., Murgatroyd, S. R., & Ward, S. A. (2010). Effect of recovery duration from prior exhaustive exercise on the parameters

- of the power-duration relationship. *J Appl Physiol* (1985), 108(4), 866-874. doi: 10.1152/jappphysiol.91425.2008
- Ferrer-Roca, V., Bescos, R., Roig, A., Galilea, P., Valero, O., & Garcia-Lopez, J. (2014). Acute effects of small changes in bicycle saddle height on gross efficiency and lower limb kinematics. *J Strength Cond Res*, 28(3), 784-791. doi: 10.1519/JSC.0b013e3182a1f1a9
- Ferrer-Roca, V., Roig, A., Galilea, P., & García-López, J. (2012). Influence of Saddle Height on Lower Limb Kinematics in Well-Trained Cyclists: Static Vs. Dynamic Evaluation in Bike Fitting. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 26(11), 3025-3029. doi: 10.1519/JSC.3020b3013e318245c318209d
- Fintelman, D. M., Sterling, M., Hemida, H., & Li, F. X. (2014). Optimal cycling time trial position models: aerodynamics versus power output and metabolic energy. *J Biomech*, 47(8), 1894-1898. doi: 10.1016/j.jbiomech.2014.02.029
- Fonda, B., & Sarabon, N. (2010). Biomechanics of Cycling *Sport Science Review* (Vol. 19, pp. 187).
- Fonda, B., & Šarabon, N. (2012). Biomechanics and Energetics of Uphill Cycling: A Review. *Kinesiology*, 44(1), 5-17.
- Foster, C. (1998). Monitoring training in athletes with reference to overtraining syndrome. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 30(7), 1164-1168.
- Foster, C., Florhaug, J. A., Franklin, J., Gottschall, L., Hrovatin, L. A., Parker, S., . . . Dodge, C. (2001). A new approach to monitoring exercise training. *J Strength Cond Res*, 15(1), 109-115.
- Francis. (1943). *Running records* (Vol. 98). Washington DC: Science Wash.
- Francis, J. T., Quinn, T. J., Amann, M., & LaRoche, D. P. (2010). Defining intensity domains from the end power of a 3-min all-out cycling test. *Med Sci Sports Exerc*, 42(9), 1769-1775. doi: 10.1249/MSS.0b013e3181d612e8
- Frederick, E. C. (1977). A statistical model of endurance in running. *Can J Appl Sport Sci*, 2, 127-132.
- Frederick, E. C. (1986). In search of the asymptote: Projecting the limits of human performance. *IJSB*, 2, 1-5.
- Fregly, B. J., Zajac, F. E., & Dairaghi, C. A. (1996). Crank inertial load has little effect on steady-state pedaling coordination. *J Biomech*, 29(12), 1559-1567.
- Garcia-Lopez, J., Ogueta-Alday, A., Larrazabal, J., & Rodriguez-Marroyo, J. A. (2014). The use of velodrome tests to evaluate aerodynamic drag in professional cyclists. *Int J Sports Med*, 35(5), 451-455. doi: 10.1055/s-0033-1355352
- García-López, J., Rodríguez-Marroyo, J. A., Juneau, C. E., Peleteiro, J., Martínez, A. C., & Villa, J. G. (2008). Reference values and improvement of aerodynamic drag in professional cyclists. *Journal of Sports Sciences*, 26(3), 277-286. doi: 10.1080/02640410701501697
- 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.
- Gibertini, G., Campanardi, G., Grassi, D., & Guercilena, L. (2011). The Study of Details Effects in Cycling Aerodynamics: Comparison between Two Different Experimental

- Approaches. In P. J. C. L. (Ed.) (Ed.), *Wind Tunnels and Experimental Fluid Dynamics Research*.
- Gibertini, G., Grassi, D., Macchi, C., & De Bortoli, G. (2010). Cycling shoe aerodynamics. *International Sports Engineering*.
- Gimenez, M., Servera, E., & Salinas, W. (1982). Square-Wave Endurance Exercise Test (SWEET) for training and assessment in trained and untrained subjects. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 49(3), 359-368.
- Godo, M. N., Corson, D., & Legensky, S. M. (2009). *An Aerodynamic Study of Bicycle Wheel Performance using CFD*. Paper presented at the 47th AIAA Aerospace Sciences Annual Meeting, Orlando, FL, USA.
- Godo, M. N., Corson, D., & Legensky, S. M. (2010). *A Comparative Aerodynamic Study of Commercial Bicycle Wheels using CFD*. Paper presented at the 48th AIAA Aerospace Sciences Annual Meeting, Orlando, FL, USA.
- Godo, M. N., Corson, D., & Legensky, S. M. (2011). *A Practical Analysis of Unsteady Flow around a Bicycle Wheel, Fork and partial Frame using CFD*. Paper presented at the 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Orlando, Florida.
- Gonzalez-Haro, C., Galilea Ballarini, P. A., Soria, M., Drobnic, F., & Escanero, J. F. (2007). Comparison of nine theoretical models for estimating the mechanical power output in cycling. *Br J Sports Med*, 41(8), 506-509; discussion 509. doi: 10.1136/bjism.2006.034934
- Gonzalez-Haro, C., Galilea, P. A., Drobnic, F., & Escanero, J. F. (2007). Validation of a field test to determine the maximal aerobic power in triathletes and endurance cyclists. *Br J Sports Med*, 41(3), 174-179. doi: 10.1136/bjism.2006.031310
- Granger, R. A. (1985). *Fluid Mechanics*. USA.
- Grappe, F. (2009). *Cyclisme et optimisation de la performance: Science et méthodologie de l'entraînement*. Bruxelles: de Boeck Université.
- Grappe, F. (2012). *Puissance et performance en cyclisme*. Bruxelles: de Boeck Université.
- Grappe, F., Candau, R., Barbier, B., Hoffman, M. D., Belli, A., & Rouillon, J. D. (1999). Influence of tyre pressure and vertical load on coefficient of rolling resistance and simulated cycling performance. *Ergonomics*, 42(10), 1361-1371. doi: 10.1080/001401399185009
- Grappe, F., Candau, R., Belli, A., & Rouillon, J. (1997). Aerodynamic drag in field cycling with special reference to the Obree's position. *Ergonomics*, 40(12), 1299-1311. doi: 10.1080/001401397187388
- Grappe, F., Candau, R., Busso, T., & Rouillon, J. D. (1998). Effect of Cycling Position on Ventilatory and Metabolic Variables. *Int J Sports Med*, 19(05), 336-341. doi: 10.1055/s-2007-971927
- Greenwell, D., Wood, N., Bridge, E., & Addy, R. (1995). Aerodynamic characteristics of low-drag bicycle wheels. *Aeronautical Journal*, 99(983), 109-120.
- Große-Lordemann, H., & Müller, E. A. (1936). Der Einfluß der Leistung und der Arbeitsgeschwindigkeit auf das Arbeitsmaximum und den Wirkungsgrad beim Radfahren. *Arbeitsphysiologie*, 9(4), 454-475. doi: 10.1007/bf02009953

- Hanna, K. R. (2002). *Can CFD make a performance difference in sport?* Paper presented at the 4th International Conference on the Engineering of Sport, Kyoto, Japan.
- Hanna, R. K. (2012). CFD in Sport - a Retrospective; 1992 - 2012. *Procedia Engineering*, 34(0), 622-627. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2012.04.106>
- Hansen, E. A., Jorgensen, L. V., Jensen, K., Fregly, B. J., & Sjogaard, G. (2002). Crank inertial load affects freely chosen pedal rate during cycling. *J Biomech*, 35(2), 277-285.
- Hansen, E. A., Jorgensen, L. V., & Sjogaard, G. (2004). A physiological counterpoint to mechanistic estimates of "internal power" during cycling at different pedal rates. *Eur J Appl Physiol*, 91(4), 435-442. doi: 10.1007/s00421-003-0997-x
- Hansen, E. A., & Waldeland, H. (2008). Seated versus standing position for maximization of performance during intense uphill cycling. *J Sports Sci*, 26(9), 977-984. doi: 10.1080/02640410801910277
- Harman, E., Knuttgen, H., Frykman, P., & Patton, J. (1987). Exercise endurance time as a function of percent maximal power production. *Medicine and science in sports and exercise*, 19(5), 480.
- Harnish, C., King, D., & Swensen, T. (2007). Effect of cycling position on oxygen uptake and preferred cadence in trained cyclists during hill climbing at various power outputs. *Eur J Appl Physiol*, 99(4), 387-391. doi: 10.1007/s00421-006-0358-7
- Hawley, J. A., & Noakes, T. D. (1992). Peak power output predicts maximal oxygen uptake and performance time in trained cyclists. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 65(1), 79-83.
- Heil, D. (2001). Body mass scaling of projected frontal area in competitive cyclists. *European Journal of Applied Physiology*, 85(3-4), 358-366.
- Hellard, P., Avalos, M., Lacoste, L., Barale, F., Chatard, J. C., & Millet, G. P. (2006). Assessing the limitations of the Banister model in monitoring training. *J Sports Sci*, 24(5), 509-520. doi: 10.1080/02640410500244697
- Hellard, P., Avalos, M., Millet, G., Lacoste, L., Barale, F., & Chatard, J. C. (2005). Modeling the residual effects and threshold saturation of training: a case study of Olympic swimmers. *J Strength Cond Res*, 19(1), 67-75. doi: 10.1519/14853.1
- Henchoz, Y., Crivelli, G., Borrani, F., & Millet, G. P. (2010). A new method to measure rolling resistance in treadmill cycling. *J Sports Sci*, 28(10), 1043-1046. doi: 10.1080/02640414.2010.498483
- Henry, F. M. (1954). Time-velocity equations and oxygen requirements of "all-out" and "steady-pace" running. *Research Quarterly. American Association for Health, Physical Education and Recreation*, 25(2), 164-177.
- Henry, F. M., & Farmer, D. S. (1949). Condition ratings and endurance measures. *Research Quarterly. American Association for Health, Physical Education and Recreation*, 20(2), 126-133.
- Hettinga, F. J., De Koning, J. J., Meijer, E., Teunissen, L., & Foster, C. (2007). Biodynamics. Effect of pacing strategy on energy expenditure during a 1500-m cycling time trial. *Med Sci Sports Exerc*, 39(12), 2212-2218. doi: 10.1249/mss.0b013e318156e8d4
- Hill, A. (1927). *Muscular movement in man: the factors governing speed & recovery from fatigue*: McGraw-Hill.

- Hill, R. (1993). The design and development of the LotusSport pursuit bicycle. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 207(4), 285-294.
- Hoerner, S. F. (1965). *Résistance à l'avancement dans les fluides*: Gauthier-Villars.
- Hopkins, W. G., Hawley, J. A., & Burke, L. M. (1999). Design and analysis of research on sport performance enhancement. *Med Sci Sports Exerc*, 31(3), 472-485.
- Howald, H., & Poortmans, J. R. (1975). *Metabolic adaptations to prolonged physical exercise*. Basel: Birkhäuser Verlag.
- Hull, M. L., Beard, A., & Varma, H. (1990). Goniometric measurement of hip motion in cycling while standing. *J Biomech*, 23(7), 687-703.
- Hull, M. L., & Hawkins, D. A. (1990). Analysis of Muscular Work in Multisegmental Movements: Application to Cycling. In J. Winters & S.-Y. Woo (Eds.), *Multiple Muscle Systems* (pp. 621-638): Springer New York.
- J. Hopker, S. M., S. A. Jobson, W. Bruce, L. Passfield. (2010). Validity and Reliability of the Wattbike Cycle Ergometer. *Int J Sports Med*.
- Jeukendrup, A., & Martin, J. (2001). Improving Cycling Performance. *Sports Medicine*, 31(7), 559-569. doi: 10.2165/00007256-200131070-00009
- Jones, A. M. (1998). A five year physiological case study of an Olympic runner. *British Journal of Sports Medicine*, 32(1), 39-43.
- Jones, A. M. (2006). The physiology of the world record holder for the women's marathon. *International Journal of Sports Science and Coaching*, 1(2), 101-116.
- Jones, A. M., Vanhatalo, A., Burnley, M., Morton, R. H., & Poole, D. C. (2009). Critical power: implications for determination of V O₂max and exercise tolerance. *Med Sci Sports Exerc*, 42(10), 1876-1890.
- Jones, A. M., Wilkerson, D. P., DiMenna, F., Fulford, J., & Poole, D. C. (2008). Muscle metabolic responses to exercise above and below the "critical power" assessed using 31P-MRS. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*, 294(2), R585-593. doi: 10.1152/ajpregu.00731.2007
- Jones, S., & Passfield, L. (1998). The dynamic calibration of bicycle power measuring cranks. *The Engineering of Sport*, 265-274.
- Karabelas, S. J., & Markatos, N. C. (2012). Aerodynamics of Fixed and Rotating Spoked Cycling Wheels. *Journal of Fluids Engineering*, 134(1), 011102-011102. doi: 10.1115/1.4005691
- Karsten, B., Jobson, S. A., Hopker, J., Jimenez, A., & Beedie, C. (2014). High agreement between laboratory and field estimates of critical power in cycling. *Int J Sports Med*, 35(4), 298-303. doi: 10.1055/s-0033-1349844
- Karsten, B., Jobson, S. A., Hopker, J., Passfield, L., & Beedie, C. (2014). The 3-min test does not provide a valid measure of critical power using the SRM isokinetic mode. *Int J Sports Med*, 35(4), 304-309. doi: 10.1055/s-0033-1349093
- Kennelly, A. E. (1906). *An approximate law of fatigue in the speeds of racing animals*. Paper presented at the Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences.
- Kyle, C. (1979). Reduction of wind resistance and power output of racing cyclists and runners travelling in groups. *Ergonomics*, 22(4), 387-397.

- Kyle, C., & Burke, E. (1984). Improving the racing bicycle. *Mechanical engineering*, 106(9), 34-45.
- Lacour, J. R., & Flandrois, R. (1977). Role of aerobic metabolism in prolonged intensive exercise. *J Physiol*, 73(2), 89-130.
- Lacour, J. R., Messonnier, L., & Bourdin, M. (2009). Physiological correlates of performance. Case study of a world-class rower. *European Journal of Applied Physiology*, 106(3), 407-413. doi: 10.1007/s00421-009-1028-3
- Lamberts, R. P., Rietjens, G. J., Tjeldink, H. H., Noakes, T. D., & Lambert, M. I. (2010). Measuring submaximal performance parameters to monitor fatigue and predict cycling performance: a case study of a world-class cyclo-cross cyclist. *European Journal of Applied Physiology*, 108(1), 183-190. doi: 10.1007/s00421-009-1291-3
- Larrazabal, Iriberry, & Muriel. (2006). *Power output related to exposure time in professional road Cycling*. Paper presented at the Endurance Sports Science Conference, Birmingham.
- Lawton, E., Martin, D., & Lee, H. (1999). *Validation of SRM power cranks using dynamic calibration*. Paper presented at the Fifth IOC World Congress.
- Léger, L., Mercier, D., & Gauvin, L. (1986). The relationship between % VO₂max and running performance time. In L. DM (Ed.), *The 1984 Olympic Scientific Congress proceedings. Sport and Elite performers* (Vol. 3, pp. 113-120). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Leirdal, S., & Ettema, G. (2011). Pedaling technique and energy cost in cycling. *Med Sci Sports Exerc*, 43(4), 701-705. doi: 10.1249/MSS.0b013e3181f6b7ea
- Li, L., & Caldwell, G. E. (1998). Muscle coordination in cycling: effect of surface incline and posture. *J Appl Physiol*, 85(3), 927-934.
- Lietzke, M. (1954). An analytical study of world and Olympic racing records. *Science*, 119(3089), 333-336.
- Lim, A. C., Homestead, E. P., Edwards, A. G., Carver, T. C., Kram, R., & Byrnes, W. C. (2011). Measuring changes in aerodynamic/rolling resistances by cycle-mounted power meters. *Med Sci Sports Exerc*, 43(5), 853-860.
- Lukes, R. A., Chin, S. B., & Haake, S. J. (2005). The understanding and development of cycling aerodynamics. *Sports Engineering*, 8(2), 59-74. doi: 10.1007/bf02844004
- Margaria, R., & Margaria, R. (1976). *Biomechanics and energetics of muscular exercise*: Clarendon Press Oxford.
- Martin, J., Milliken, D. L., Cobb, J. E., McFadden, K. L., & Coggan, A. R. (1998). Validation of a mathematical model for road cycling power. *Journal of applied biomechanics*, 14, 276-291.
- Martin, J. C., Gardner, A. S., Barras, M., & Martin, D. T. (2006). Modeling sprint cycling using field-derived parameters and forward integration. *Med Sci Sports Exerc*, 38(3), 592-597. doi: 10.1249/01.mss.0000193560.34022.04
- McLean, B., Danaher, R., Thompson, L., Forbes, A., & Coco, G. (1994). Aerodynamic characteristics of cycle wheels and racing cyclists. *Journal of biomechanics*, 27(6), 675.
- Meade. (1916). An analytical study of athletic records. *Sci Monthly*, 2, 596-600.
- Meade, G. P., & Lietzke, M. (1956). Consistent running records. *Science*, 124, 1025.

- Menaspà, P., Quod, M., Martin, D. T., Victor, J., & Abbiss, C. R. (2013). Physiological demands of road sprinting in professional and U23 cycling. A pilot study. *Journal of Science and Cycling*, 2(2).
- Mercier, D., Léger, L., & Desjardins, M. (1984). Nomogramme pour prédire la performance, le VO₂max et l'endurance relative en course de fond. *Méd Sport*, 58, 181-187.
- Messonnier, L., Bourdin, M., & Lacour, J. R. (1998). Influence of age on different determining factors of performance on rowing ergometer. *Science and Sports*, 13(6), 293-294. doi: 10.1016/s0765-1597(99)80011-2
- Mikulic, P. (2011). Maturation to elite status: a six-year physiological case study of a world champion rowing crew. *European Journal of Applied Physiology*, 111(9), 2363-2368. doi: 10.1007/s00421-011-1870-y
- Millet, G. P., Candau, R., Barbier, B., Busso, T., Rouillon, J. D., & Chatard, J. C. (2002). Modelling the transfers of training effects on performance in elite triathletes. *Int J Sports Med*, 23(1), 55-63. doi: 10.1055/s-2002-19276
- Millet, G. P., Tronche, C., Fuster, N., & Candau, R. (2002). Level ground and uphill cycling efficiency in seated and standing positions. *Med Sci Sports Exerc*, 34(10), 1645-1652. doi: 10.1249/01.MSS.0000031482.14781.D7
- Millet, G. P., Tronche, C., & Grappe, F. (2013). Accuracy of Indirect Estimation of Power Output From Uphill Performance in Cycling. *International Journal of Sports Physiology and Performance*.
- Minetti, A. E. (2011). Bioenergetics and biomechanics of cycling: the role of 'internal work'. *Eur J Appl Physiol*, 111(3), 323-329. doi: 10.1007/s00421-010-1434-6
- Monod, H., & Scherrer, J. (1965). The work capacity of a synergic muscular group. *Ergonomics*, 8(3), 329-338.
- Montmayer, A., & Villaret, M. (1990). Etude de la vitesse maximale aérobie derriere cycliste. *Sci Motricité*, 10, 27-31.
- Moria, H., Alam, F., Chowdhury, H., & Subic, A. (2012). The compression effect on aerodynamic properties of sports fabrics. *Procedia Engineering*, 34(0), 56-61. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2012.04.011>
- Moritani, T., Nagata, A., Devries, H. A., & Muro, M. (1981). Critical power as a measure of physical work capacity and anaerobic threshold. *Ergonomics*, 24(5), 339-350.
- Morton, R. H. (1986). A three component model of human bioenergetics. *J Math Biol*, 24(4), 451-466.
- Morton, R. H. (1990). Modelling human power and endurance. *J Math Biol*, 28(1), 49-64.
- Morton, R. H. (2006). The critical power and related whole-body bioenergetic models. *Eur J Appl Physiol*, 96(4), 339-354.
- Morton, R. H., & Hodgson, D. J. (1996). The relationship between power output and endurance: a brief review. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 73(6), 491-502.
- Mujika, I., Busso, T., Lacoste, L., Barale, F., Geysant, A., & Chatard, J. C. (1996). Modeled responses to training and taper in competitive swimmers. *Med Sci Sports Exerc*, 28(2), 251-258.
- Murgatroyd, S. R., Ferguson, C., Ward, S. A., Whipp, B. J., & Rossiter, H. B. (2011). Pulmonary O₂ uptake kinetics as a determinant of high-intensity exercise tolerance in

- humans. *J Appl Physiol* (1985), 110(6), 1598-1606. doi: 10.1152/jappphysiol.01092.2010
- Murgatroyd, S. R., & Wylde, L. A. (2011). The power-duration relationship of high-intensity exercise: from mathematical parameters to physiological mechanisms. *J Physiol*, 589(Pt 10), 2443-2445. doi: 10.1113/jphysiol.2011.209346
- Nimmerichter, A., Williams, C., Bachl, N., & Eston, R. (2010). Evaluation of a field test to assess performance in elite cyclists. *International Journal of Sports Medicine*, 31(3), 160-166.
- Nonweiler, T. R. F. (1956). *The Air Resistance of Racing Cyclists*: College of Aeronautics, Cranfield.
- Noordhof, D. A., Skiba, P. F., & de Koning, J. J. (2013). Determining anaerobic capacity in sporting activities. *Int J Sports Physiol Perform*, 8(5), 475-482.
- Oggiano, L., Leirdal, S., Sætran, L., & Ettema, G. (2008). Aerodynamic Optimization and Energy Saving of Cycling Postures for International Elite Level Cyclists (P114) *The Engineering of Sport 7* (pp. 597-604): Springer Paris.
- Olds, T. S. (2001). Modelling Human Locomotion. *Sports Medicine*, 31(7), 497-509. doi: 10.2165/00007256-200131070-00005
- Olds, T. S., Norton, K. I., Lowe, E., Olive, S., Reay, F., & Ly, S. (1995). Modeling road-cycling performance. *Journal of Applied Physiology*, 78(4), 1596-1611.
- Olds, T. S., & Olive, S. (1999). Methodological considerations in the determination of projected frontal area in cyclists. *Journal of Sports Sciences*, 17(4), 335-345.
- Padilla, S., Mujika, I., Orbañanos, J., & Angulo, F. (2000). Exercise intensity during competition time trials in professional road cycling. *Medicine and science in sports and exercise*, 32(4), 850.
- Peronnet, F., & Thibault, G. (1984). Consommation maximale d'oxygène, endurance et performance en course à pied. *Macolin*, 7, 15-18.
- Peronnet, F., & Thibault, G. (1987). Physiological analysis of running performance: revision of the hyperbolic model. *J Physiol*, 82(1), 52-60.
- Peronnet, F., & Thibault, G. (1989). Mathematical analysis of running performance and world running records. *J Appl Physiol*, 67(1), 453-465.
- Peronnet, F., Thibault, G., Rhodes, E. C., & McKenzie, D. C. (1987). Correlation between ventilatory threshold and endurance capability in marathon runners. *Med Sci Sports Exerc*, 19(6), 610-615.
- Perrey, S., & Candau, R. (2002). Déterminants des différentes phases de la cinétique de la consommation d'oxygène chez l'homme. *Science & Sports*, 17(5), 220-233. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0765-1597\(02\)00150-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0765-1597(02)00150-8)
- Pfau, T., Witte, T. H., & Wilson, A. M. (2005). A method for deriving displacement data during cyclical movement using an inertial sensor. *Journal of Experimental Biology*, 208(13), 2503-2514.
- Pinot, J., & Grappe, F. (2011). The record power profile to assess performance in elite cyclists. *International Journal of Sports Medicine*, 32(11), 839-844.
- Pinot, J., & Grappe, F. (2014). Determination of Maximal Aerobic Power from the Record Power Profile to improve cycling training. *Journal of Science and Cycling*, 3(1), 26-31.

- Poole, D. C., Ward, S. A., Gardner, G. W., & Whipp, B. J. (1988). Metabolic and respiratory profile of the upper limit for prolonged exercise in man. *Ergonomics*, *31*(9), 1265-1279. doi: 10.1080/00140138808966766
- Predine, E., Gimenez, M., & Serrano, E. (1989). Nouvelle méthode d'évaluation et d'entraînement à l'endurance en course chez des enfants d'âge scolaire. *STAPS. Sciences et techniques des activités physiques et sportives*(19), 7-15.
- Quod, M. J., Martin, D. T., Martin, J. C., & Laursen, P. B. (2010). The power profile predicts road cycling MMP. *International Journal of Sports Medicine*, *31*(6), 397-401.
- Rodriguez-Marroyo, J. A., Villa, G., Garcia-Lopez, J., & Foster, C. (2012). Comparison of heart rate and session rating of perceived exertion methods of defining exercise load in cyclists. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *26*(8), 2249-2257. doi: 10.1519/JSC.0b013e31823a4233
- Rusko, H. K. (1992). Development of aerobic power in relation to age and training in cross-country skiers. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, *24*(9), 1040-1047.
- Saltin, B. (1973). Oxygen transport by the circulatory system during exercise in man. In Keule (Ed.), *Limiting factors of physical performance* (pp. 235-252). Stuttgart: Thieme.
- Sassi, A., Marcora, S. M., Rampinini, E., Mognoni, P., & Impellizzeri, F. M. (2006). Prediction of time to exhaustion from blood lactate response during submaximal exercise in competitive cyclists. *European Journal of Applied Physiology*, *97*(2), 174-180.
- Sayers, A. T., & Stanley, P. (1994). Drag force on rotating racing cycle wheels. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, *53*(3), 431-440. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0167-6105\(94\)90094-9](http://dx.doi.org/10.1016/0167-6105(94)90094-9)
- Scherrer, J., & Monod, H. (1960). Le travail musculaire local et la fatigue chez l'Homme. *J Physiol (Paris)*, *52*, 419-501.
- Scherrer, J., Samson, M., & Paleologue, A. (1954). Etude du travail musculaire et de la fatigue: données ergométriques obtenues chez l'Homme. *J. Physiol. (Paris)*, *46*, 887-916.
- Sidorovich, I. (2012). Cervelo P5 development. Retrieved from <http://www.cd-adapco.com/search/node/cervelo> website:
- Skiba, P. F., Chidnok, W., Vanhatalo, A., & Jones, A. M. (2012). Modeling the expenditure and reconstitution of work capacity above critical power. *Med Sci Sports Exerc*, *44*(8), 1526-1532. doi: 10.1249/MSS.0b013e3182517a80
- Skiba, P. F., Fulford, J., Clarke, D. C., Vanhatalo, A., & Jones, A. M. (2014). Intramuscular determinants of the ability to recover work capacity above critical power. *Eur J Appl Physiol*. doi: 10.1007/s00421-014-3050-3
- Skiba, P. F., Jackman, S., Clarke, D., Vanhatalo, A., & Jones, A. M. (2014). Effect of work and recovery durations on W' reconstitution during intermittent exercise. *Med Sci Sports Exerc*, *46*(7), 1433-1440. doi: 10.1249/MSS.0000000000000226
- Sundström, D., Carlsson, P., & Tinnsten, M. (2014). Comparing bioenergetic models for the optimisation of pacing strategy in road cycling. *Sports Engineering*, *17*(4), 207-215. doi: 10.1007/s12283-014-0156-0

- Swain, D. P., & Wilcox, J. P. (1992). Effect of cadence on the economy of uphill cycling. *Medicine and science in sports and exercise*, 24(10), 1123-1127.
- Tanaka, H., Bassett Jr., D. R., Best, S. K., & Baker Jr., K. R. (1996). Seated Versus Standing Cycling in Competitive Road Cyclists: Uphill Climbing and Maximal Oxygen Uptake. *Canadian Journal of Applied Physiology*, 21(2), 149-154. doi: doi:10.1139/h96-013
- Tew, G. S., & Sayers, A. T. (1999). Aerodynamics of yawed racing cycle wheels. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 82(1-3), 209-222. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-6105\(99\)00034-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-6105(99)00034-3)
- Thibault, G. (1988). *Modélisation de la performance en course à pied* Université de Montréal, Montréal.
- Thibault, G. (2009). Quel est votre capacité d'Endurance? In E. Faton (Ed.), *Sport et Vie* (Vol. 116, pp. 17-25).
- Thys, H. (2001). Place de l'énergie mécanique dans le déterminisme du coût énergétique de la locomotion. *STAPS*, 54, 131-143.
- Tokmakidis, S. P., Leger, L., Mercier, D., Peronnet, F., & Thibault, G. (1987). New approaches to predict VO₂max and endurance from running performances. *J SPORTS MED PHYS FITNESS*, 27(4), 401-409.
- Tornvall, G. (1963). Assessment of physical capabilities. *Acta Physiol Scand*, 58(Suppl 201), 1-102.
- Underwood, L., & Jermy, M. C. (2011). Fabric testing for cycling skinsuits. *Procedia Engineering*, 13(0), 350-356. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2011.05.097>
- Underwood, L., Schumacher, J., Burette-Pommay, J., & Jermy, M. (2011). Aerodynamic drag and biomechanical power of a track cyclist as a function of shoulder and torso angles. *Sports Engineering*, 14(2-4), 147-154. doi: 10.1007/s12283-011-0078-z
- Vanhatalo, A., Doust, J. H., & Burnley, M. (2007). Determination of critical power using a 3-min all-out cycling test. *Med Sci Sports Exerc*, 39(3), 548-555. doi: 10.1249/mss.0b013e31802dd3e6
- Vanhatalo, A., Doust, J. H., & Burnley, M. (2008a). A 3-min all-out cycling test is sensitive to a change in critical power. *Med Sci Sports Exerc*, 40(9), 1693-1699. doi: 10.1249/MSS.0b013e318177871a
- Vanhatalo, A., Doust, J. H., & Burnley, M. (2008b). Robustness of a 3 min all-out cycling test to manipulations of power profile and cadence in humans. *Exp Physiol*, 93(3), 383-390. doi: 10.1113/expphysiol.2007.039883
- Vanhatalo, A., Fulford, J., DiMenna, F. J., & Jones, A. M. (2010). Influence of hyperoxia on muscle metabolic responses and the power-duration relationship during severe-intensity exercise in humans: a 31P magnetic resonance spectroscopy study. *Exp Physiol*, 95(4), 528-540. doi: 10.1113/expphysiol.2009.050500
- Vanhatalo, A., & Jones, A. M. (2009). Influence of prior sprint exercise on the parameters of the 'all-out critical power test' in men. *Exp Physiol*, 94(2), 255-263. doi: 10.1113/expphysiol.2008.045229
- Vanhatalo, A., Jones, A. M., & Burnley, M. (2011). Application of critical power in sport. *Int J Sports Physiol Perform*, 6(1), 128-136.
- Velofacts. (2014). <http://www.friction-facts.com/test-results/report-packages/report-package>.

- Villierius, V., Dupuis, P., & Grappe, F. (2007). *Détermination du profil physiologique des coureurs cyclistes compétitifs à partir de la mesure de la puissance développée : étude préliminaire*. Paper presented at the 12ème Congrès Internationale de l'ACAPS, Leuven.
- Vogt, S., Heinrich, L., Schumacher, Y. O., Blum, A., Roecker, K., Dickhuth, H. H., & Schmid, A. (2006). Power output during stage racing in professional road cycling. *Med Sci Sports Exerc*, 38(1), 147-151.
- Vogt, S., Roecker, K., Schumacher, Y. O., Pottgiesser, T., Dickhuth, H. H., Schmid, A., & Heinrich, L. (2008). Cadence-power-relationship during decisive mountain ascents at the Tour de France. *International Journal of Sports Medicine*, 29(3), 244-250.
- Vogt, S., Schumacher, Y. O., Blum, A., Roecker, K., Dickhuth, H. H., Schmid, A., & Heinrich, L. (2007). Cycling power output produced during flat and mountain stages in the Giro d'Italia: a case study. *Journal of Sports Sciences*, 25(12), 1299-1305.
- Vogt, S., Schumacher, Y. O., Roecker, K., Dickhuth, H. H., Schoberer, U., Schmid, A., & Heinrich, L. (2007). Power Output during the Tour de France. *International Journal of Sports Medicine*, 28(9), 756-761. doi: 10.1055/s-2007-964982
- Whipp, B., Huntsman, D., Storer, T., Lamarra, N., & Wasserman, K. (1982). *A constant which determines the duration of tolerance to high-intensity work*. Paper presented at the Federation Proceedings.
- Wilkie, D. (1980). Equations describing power input by humans as a function of duration of exercise. *Exercise bioenergetics and gas exchange*. Elsevier, Amsterdam, 75-80.
- Wood, R. E., Hayter, S., Rowbottom, D., & Stewart, I. (2005). Applying a mathematical model to training adaptation in a distance runner. *Eur J Appl Physiol*, 94(3), 310-316. doi: 10.1007/s00421-005-1319-2
- Wooles, A., Robinson, A., & Keen, P. (2005). A static method for obtaining a calibration factor for SRM bicycle power cranks. *Sports Engineering*, 8(3), 137-144. doi: 10.1007/bf02844014
- Zdravkovich, M. (1992). Aerodynamics of bicycle wheel and frame. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 40(1), 55-70.

ANNEXES

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

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

RESEARCH ARTICLE

Open Access

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

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

Abstract

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

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

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

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

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

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

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

⁵ Exploration Fonctionnelles, CHRU de Besançon, France.

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

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

Introduction

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

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

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



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

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

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

Materials and methods

Design

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

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

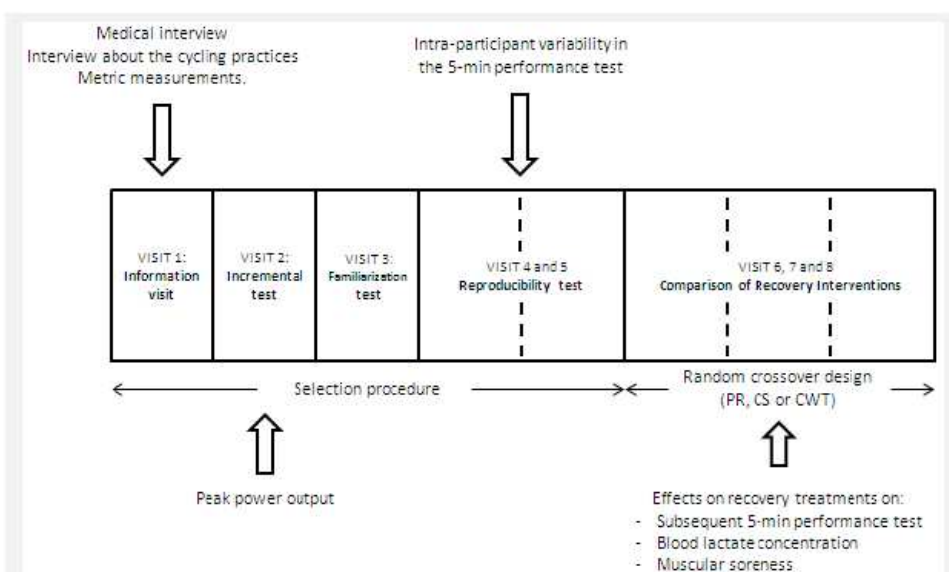


Figure 1. Experimental design.

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

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

Our protocol comprised two parts:

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

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

Participants

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

medication.

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

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

Testing Conditions

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

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

Selection Procedures

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

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

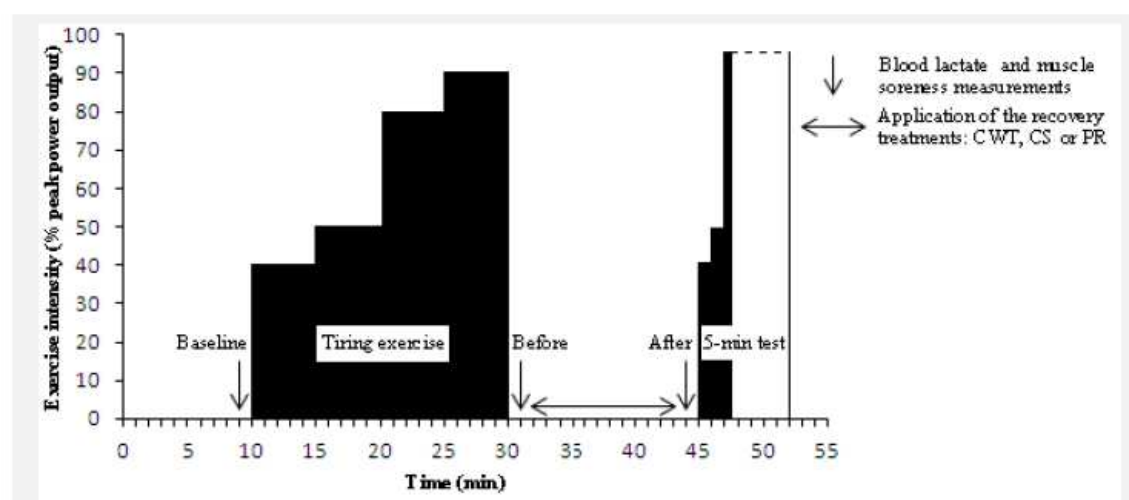


Figure 2. Design of the recovery interventions comparison.

practices; and metric measurements.

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

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

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

Comparison of Recovery Interventions

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

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

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

Recovery Interventions

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

Statistical Analyses

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

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

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

Results

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

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

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

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

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

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

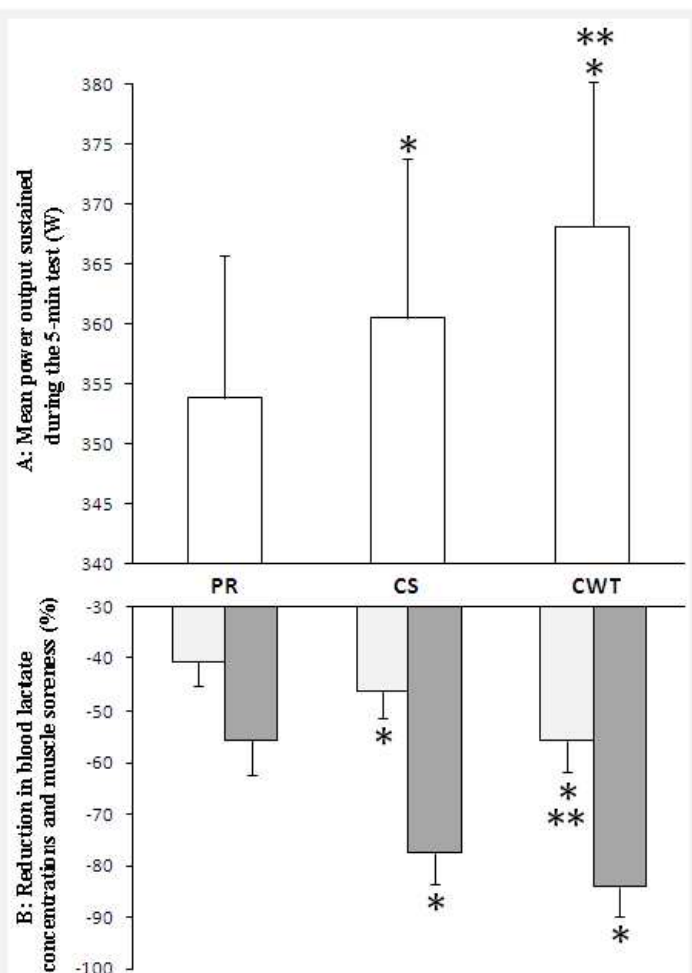


Figure 2. panel A: mean power output sustained over the 5-min test and panel B: reduction in blood lactate concentrations and muscle soreness (%) (Corresponding to: [(after the application of the recovery interventions data) / before the application of the recovery interventions data] * 100) during the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

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

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

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

Discussion

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

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

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

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

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

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

Practical applications

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

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

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

Acknowledgment

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

References

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

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

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

416 Letter to the Editor

J. Pinot, F. Grappe

Letter to the Editor

Dear Editors,

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

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

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

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

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

From these explanations, we ask for your understanding.

Sincerely,

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

References

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

Correspondence

Julien Pinot, PhD Student

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

Frederic Grappe, PhD

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

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

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



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

J. Pinot* and F. Grappe

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

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

1. Introduction

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

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

2. Methods

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

3. Results and discussion

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

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

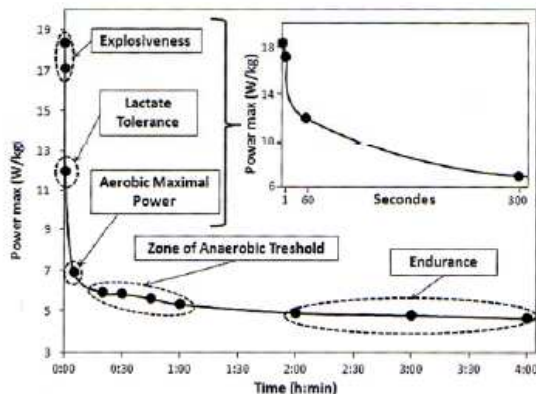


Figure 1. Determination of the different physical capacities of a cyclist from the PP.

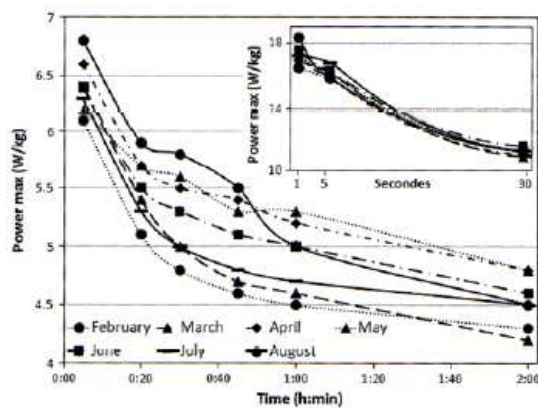


Figure 2. PO longitudinal follow-up per month for a cyclist from 1 s to 2 h durations.

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

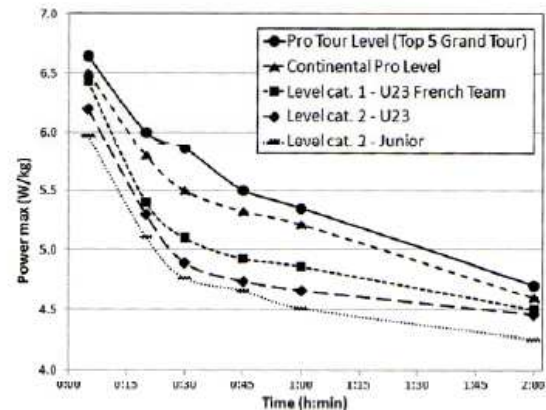


Figure 3. Changes in PP for five cyclists of different categories between 5 min and 2 h durations.

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

4. Conclusion

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

References

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

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

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



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

J. Pinot* and F. Grappe

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

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

1. Introduction

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

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

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

2. Methods

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

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

3. Results and discussion

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

*Corresponding author. Email: julienpinot@laposte.net

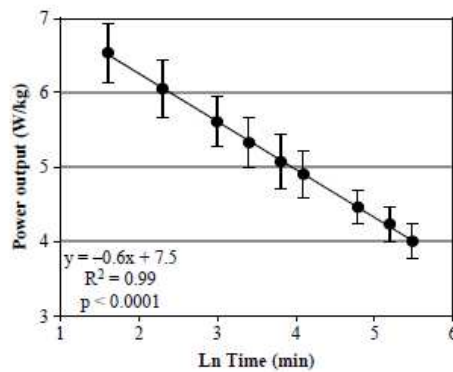


Figure 1. Average RPP expressed on a logarithmic scale of time for the 20 cyclists.

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

$$PO = -0.6 \ln T + 7.5 \text{ (with } \ln T$$

= natural logarithm of cycling duration in minutes).

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

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

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

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

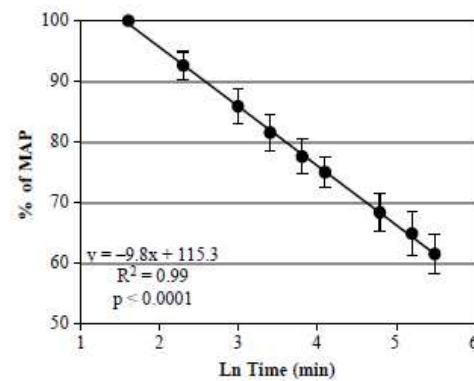


Figure 2. Reduction of PO expressed in %MAP with total cycling time for the 20 cyclists.

4. Conclusions

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

References

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

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

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

Julien Pinot¹ & Frédéric Grappe¹

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

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

Keywords: Cyclisme, Puissance mécanique, Endurance, Potentiel physique

INTRODUCTION

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

METHODES

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

RESULTATS

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

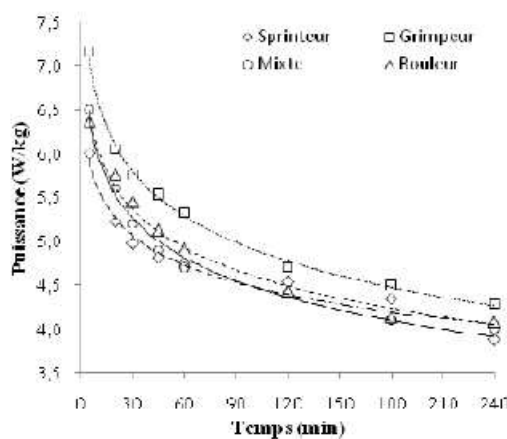


Figure 1 : Profil de Puissance Record des 4 cyclistes (Pointillés : grimpeur, tirets : rouleur, trait plein : mixte, trait discontinu : sprinteur).

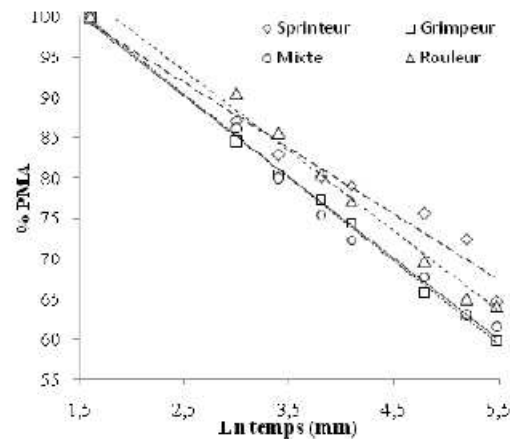


Figure 2 : Relations % PMA – Ln t des 4 cyclistes (Pointillés : grimpeur, tirets : rouleur, trait plein : mixte, trait discontinu : sprinteur).

DISCUSSION

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

CONCLUSION

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

BIBLIOGRAPHIE

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

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

O6-3 |

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

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

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

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

INTRODUCTION

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

METHODES

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

RESULTATS

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

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

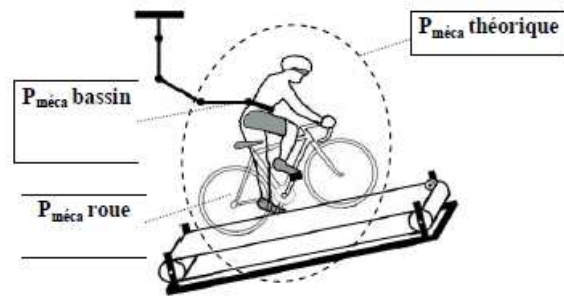


Figure 1. Représentation du cycliste équipé du bras cinématique sur le tapis roulant

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

DISCUSSION & CONCLUSION

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

BIBLIOGRAPHIE

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

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

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

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

BOOK OF ABSTRACTS

Open Access

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

J Pinot^{1,2}✉ and F Grappe^{1,2}

Abstract

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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





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

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

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



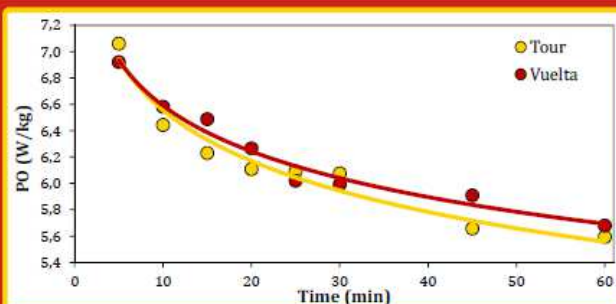
Introduction

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

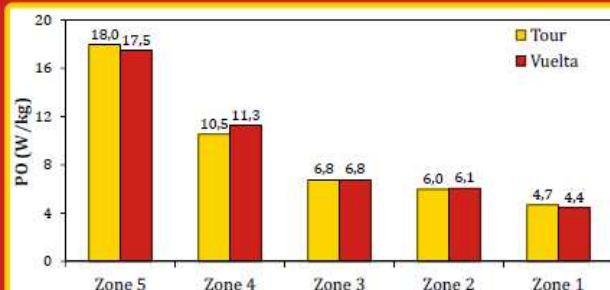
investigated power output (PO) during Grand Tour [3] but none has made PO measurement on a top-10 overall ranking cyclist to compare PO in different intensity zones in TdF and VaE. The purpose of this study was to compare the physical performance level between TdF and VaE of a top-10 overall ranking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

Methods

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



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



Results

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

Discussion

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

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

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

References

- [1] Lucia, A., Hoyos, J., Santalla, A., Earnest, C., & Chicharro, J. L. (2003). Tour de France versus Vuelta a Espana: which is harder? *Med Sci Sports Exerc*, 35(5), 872-878.
 [2] Pinot, J., & Grappe, F. (2011). The record power profile to assess performance in elite cyclists. *Int J Sports Med*, 32(11), 839-844.
 [3] Vogt, S., Schumacher, Y. O., Roecker, K., Dickhuth, H. H., Schoberer, U., Schmid, A., & Heinrich, L. (2007). Power Output during the Tour de France. *Int J Sports Med*, 28(9), 756-761.