

UNIVERSITÉ DE BOURGOGNE FRANCHE-COMTÉ
Unité de promotion, de formation et de recherche des sports de Besançon

École doctorale n°554
Environnements-Santé

Doctorat en Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives (STAPS)

**ÉTUDE DES MÉCANISMES PSYCHOPHYSIOLOGIQUES IMPLIQUÉS
DANS LA RÉALISATION D'UNE PERFORMANCE CYCLISTE DE
HAUT-NIVEAU**

Thèse présentée et soutenue publiquement à Besançon, le 6 Décembre 2018

par **Théo OUVRARD**

Membres du Jury :

M. William BERTUCCI (Président)	Professeur des Universités Université de Reims Champagne-Ardenne
M. Jérémy COQUART (Rapporteur)	Professeur des Universités Université de Rouen-Normandie
M. Bertrand BARON (Rapporteur)	Maitre de Conférences HDR Université de La Réunion
M. Sébastien DUC (Examineur)	Maitre de Conférences Université de Reims Champagne-Ardenne
M. Frédéric GRAPPE (Invité)	Maitre de Conférences HDR Université de Bourgogne Franche-Comté
M. Alain GROSLAMBERT (Directeur)	Professeur des Universités Université de Bourgogne Franche-Comté

REMERCIEMENT

Avant de commencer cet ouvrage, je tiens à remercier l'ensemble des personnes qui ont contribué au bon déroulement de ces trois années de thèse.

Je tiens tout d'abord à remercier Alain GROSLAMBERT, pour avoir su diriger avec succès l'ensemble de ces travaux. Votre patience et votre bienveillance ont été essentielles pour me guider au sein de ce monde inconnu que représentait pour moi la recherche scientifique à l'aube de notre collaboration. Je vous remercie Alain pour tout le temps que vous m'avez consacré et pour avoir partagé avec moi vos connaissances et votre expérience.

Je tiens également à remercier Fred GRAPPE, co-directeur officiel de ces travaux. Merci Fred pour toutes les connaissances que tu as su me transmettre au cours de ces nombreuses années de collaboration, mais surtout un immense merci pour m'avoir permis de rejoindre le milieu très fermé des entraîneurs cyclistes de haut-niveau. Je n'aurais probablement jamais eu la chance de vivre toutes les expériences formidables que m'offrent désormais le monde cycliste professionnel sans ton soutien.

J'adresse mes remerciements au Pr. Gilles FERREOL pour m'avoir accueilli au sein de l'équipe C3S et pour m'avoir permis d'effectuer ces années de thèse. Merci Mr. FERREOL pour vos enseignements et pour la formation dispensée par le laboratoire C3S à travers les nombreux séminaires, colloques et conférences multidisciplinaires fort intéressants.

J'adresse toute ma gratitude et mes remerciements aux membres du jury, les Pr. William BERTUCCI, Jérémy COQUARD ainsi que les Dr. Sébastien DUC et Bertrand BARON, d'avoir accepté d'évaluer ce travail. Que mon travail puisse passer entre les mains de tels experts est pour moi un grand honneur.

Je tiens également à remercier l'ensemble des cyclistes et des entraîneurs ayant participé aux différentes études de cette thèse. L'ensemble de ces travaux n'aurait pas pu être rendu possible sans votre disponibilité et votre investissement. J'ai notamment une pensée toute particulière pour mes nouveaux compères Julien PINOT, Vincent VILLERIUS, Samuel BELLENOUE, Jean-Baptiste QUICLET, Rémy DEUTSCH et Nico BOISSON. Merci pour la

bienveillance dont vous avez toujours fait preuve à mon égard. C'est une très grande fierté et un très grand plaisir pour moi de pouvoir désormais vous considérer comme mes confrères.

Je remercie également l'ensemble des collègues et amis du laboratoire C3S, Audrey, Sidney, Philippe, Sébastien, Annick... Merci pour tous les merveilleux moments que nous avons pu partager, et pour tout le soutien que vous avez toujours su m'apporter.

Un grand merci à tous mes collègues doctorants du COPS, Julien encore une fois, Romain, Claire, Anthony, Philémon et Lucas. Ce fût trois années de pur bonheur que de pouvoir vous côtoyer dans notre bureau. Encore merci pour tout ce que vous avez fait pour moi, et bon courage au petit dernier Philémon dans les deux années qui lui restent encore afin de suivre la voie tracée par ses glorieux prédécesseurs.

Mes remerciements vont également à l'ensemble des étudiants que j'ai pu côtoyer lors de ces trois années passées à l'UPFR des Sports de Besançon, et plus particulièrement à Lucas, Maxime P., Maxim, Maxime C., Antonin, Joseph, Maxime L., Simon, Pierre, Baptiste et Maxence. Merci pour votre investissement dans ces différents travaux et pour tout ce que nous avons également pu partager en dehors. Je vous souhaite le meilleur pour la suite de votre parcours.

Alors qu'une page importante de ma vie est sur le point de se tourner, je tiens également à remercier Emmanuel HUBERT pour me permettre d'en ouvrir une nouvelle au sein de l'équipe Fortunéo – Samsic. C'est un véritable honneur pour moi de pouvoir m'engager dans cette nouvelle aventure. Je tiens également à remercier tous les coureurs et tous les membres du staff que j'ai déjà pu côtoyer depuis un an au sein de cette équipe, Jérémy, Bram, Clément, Romain, Elie, Franck, Sindre, Michael, Warren, Marion, Aline, Elen, Greg, Jeff, Brian, Nico, Yann, Philippe, Florian, Pascal, Edouard, Antoine, Delphine, Johan, Nenesse, Stevann, Cédric, Jean-Jacques, Christine, Claudine, Franck, Denis, Vonvon, Yvon, Gégé, Seb, et bien d'autres... Cette année n'a pas forcément été la plus simple pour moi, mais grâce à votre gentillesse et l'accueil remarquable que vous m'avez réservé, il ne s'est pas écoulé un seul instant sans que je déborde d'impatience et de plaisir à l'idée de vous rejoindre en course ou en stage. Encore merci pour tout ce que nous avons déjà partagé, et j'espère que nous pourrions encore vivre de nombreuses aventures ensemble.

J'ai forcément également une pensée très forte pour ceux qui m'ont soutenu dès le début de cette aventure à Nantes, et en particulier Anthony et Thierry « Tonton » de l'UCNA, ainsi que Sylvain. Merci à vous trois pour m'avoir fait découvrir le monde du cyclisme de haut-niveau et pour avoir veillé sur moi comme vous l'avez fait. Je ne serais probablement jamais devenu la personne que je suis aujourd'hui sans vous.

Enfin, je tiens également à remercier l'ensemble de mes proches, amis comme famille, pour tout ce qu'ils m'ont apporté. Maman, Mamie, Papy, Mémère, Pépère, Alex, Flavien, Lucas, Jessie, et tous ceux que je vais malheureusement oublier ici, merci de m'avoir toujours soutenu, dans les bons comme dans les mauvais moments. Je ne trouve pas les mots pour vous décrire tout ce que vous avez pu m'apporter.

Cela me paraît naturel de terminer ces remerciements par mon Papa, qui m'a toujours tout offert pour me permettre de réaliser mes rêves. Je n'ai jamais été très doué pour te dire ce que je ressens, mais j'espère de tout cœur que tu es fier de moi et de tout ce que j'ai pu accomplir grâce à toi. Même dans les moments les plus difficiles cela a toujours été ma plus grande motivation que de pouvoir ainsi te rendre tout ce que tu as pu m'offrir.

ÉTUDE DES MÉCANISMES PSYCHOPHYSIOLOGIQUES IMPLIQUÉS DANS LA RÉALISATION D'UNE PERFORMANCE CYCLISTE DE HAUT-NIVEAU

Université de Bourgogne Franche-Comté

RÉSUMÉ

Les travaux conduits dans le cadre de cette thèse avaient pour objectif d'étudier les mécanismes psychophysiologiques impliqués dans la mobilisation et la gestion des ressources nécessaires à la réalisation d'une performance de haut niveau en cyclisme sur route. Les mécanismes centraux et les paramètres psychologiques susceptibles d'influencer la commande motrice ont ainsi été analysés dans le contexte de compétitions cyclistes de haut-niveau.

L'ensemble des résultats obtenus mettent en évidence que les mécanismes de régulation de l'intensité d'exercice, évalués à l'aide de la nouvelle méthode « Exposure Variation Analysis » (EVA) développée dans le cadre de cette thèse, seraient des paramètres déterminants pour la performance cycliste en contre-la-montre (CLM). En compétition officielle, la capacité du cycliste à exploiter au mieux ses qualités physiques et donc à développer la plus haute puissance moyenne possible était directement liée à sa capacité à maintenir un niveau d'intensité d'exercice constant sur l'ensemble du CLM. De plus, cette justesse de régulation de l'intensité de l'effort serait également liée aux paramètres psychologiques de plaisir ressenti et de focus attentionnel : plus l'athlète ressentait un plaisir important et était capable de focaliser ses pensées sur des éléments extérieurs pertinents pour la performance et plus il était capable de maintenir un niveau de puissance constant sur l'ensemble de l'effort. Ainsi, la performance cycliste serait dépendante de l'interaction complexe entre les paramètres psychologiques, les mécanismes de régulation de l'effort et les qualités physiques des athlètes.

Cependant, les résultats des études menées dans le cadre de cette thèse mettent également en évidence que les mécanismes de régulation de l'intensité d'exercice et les paramètres psychologiques associés varient selon le contexte environnemental et les caractéristiques de l'effort réalisé. Par exemple, la présence d'un équipier en montée permettrait au cycliste de ressentir un plaisir plus élevé pendant l'effort et de puiser davantage dans ses réserves afin de réaliser un sprint final plus important dans les derniers mètres avant l'arrivée. A l'inverse, les cyclistes de niveau élite possèderaient des qualités de gestion de l'effort remarquables leur permettant de réguler l'effort de manière identique lors de plusieurs montées répétées que lors d'un effort unique. L'étude de la performance cycliste doit donc prendre en compte le contexte environnemental ainsi que les caractéristiques des athlètes et de l'effort réalisé afin de réellement permettre une compréhension complète de la performance cycliste de haut-niveau.

De plus, ces résultats mettent également en évidence que les mécanismes de régulation de l'effort peuvent évoluer entre les différentes compétitions, et pourraient ainsi expliquer les variations journalières de performance pour un même niveau de qualité physique. Les travaux menés dans le cadre de cette thèse ont ainsi tenté d'optimiser la méthode EVA afin de permettre le suivi de la justesse des mécanismes de régulation de l'effort du cycliste lors de plusieurs CLM. Cette méthode pourrait se révéler très intéressante pour les entraîneurs et les athlètes sur le terrain afin de tenter d'optimiser leurs mécanismes de régulation de l'effort avec l'entraînement dans le but d'exploiter au mieux leurs qualités physiques. Des techniques psychologiques pourraient notamment être utilisées afin d'augmenter le plaisir ressenti des athlètes ou d'optimiser leur gestion des pensées pendant l'effort, leur permettant ainsi de mieux réguler l'intensité d'exercice et d'améliorer leurs performances en CLM.

Présenté par : Théo OUVRARD

Directeur : Alain GROSLAMBERT

Mots-clefs : *Cyclisme, Performance, Gestion de l'effort, Perception de l'effort, Psychologie du sport, Physiologie de l'exercice.*

ANALYSIS OF THE PSYCHOPHYSIOLOGICAL AND BIOMECHANICAL MECHANISMS OF ELITE CYCLING PERFORMANCE

University of Burgundy Franche-Comté

ABSTRACT

The studies conducted during this PhD thesis aimed to analyse the psychophysiological and biomechanical mechanisms of effort regulation during elite road cycling performance. Central mechanisms and psychological parameters influencing motor units recruitment were studied in different contexts of elite road cycling competitions.

All the results show that exercise intensity regulation, quantified using the “Exposure Variation Analysis” method developed during this PhD, is a key parameter of cycling individual time-trial (ITT) performance. During official competitive ITT, the cyclists’ abilities to have a maximal use of their physical capacities in order to develop the highest mean power output possible was strongly related to their abilities to maintain a constant level of exercise intensity during the entire ITT. These exercise intensity regulation mechanisms were also strongly related to pleasure and attentional focus psychological parameters: the more the athletes felt a high level of pleasure and were able to focus mainly on external thoughts salient to the performance, the more they were able to maintain a constant power output over the entire ITT. Cycling performance seems related to the complex interaction between psychological parameters, exercise intensity regulation mechanisms and physical capacities.

However, the studies conducted also revealed that exercise intensity regulation mechanisms and psychological parameters varied depending on the environmental context and the characteristics of the effort. For example, a leading teammate in uphill cycling allowed the athlete to increase their pleasure and to dig deeper into their physiological reserves in order to perform a greater end-spurt. Conversely, elite cyclists exhibited outstanding exercise intensity regulation capacities which allowed them to regulate their effort during repeated uphill ITT in the same way that during single ITT. Consequently, the study of elite cycling performance must consider both environmental context and characteristics of the athletes concerned to allow a complete understanding of the mechanisms underlying performance.

Furthermore, these results also underline that exercise intensity regulation mechanisms can vary between races, and consequently can explain the day-to-day variability in cycling performance despite similar physical capacities. Thus, the EVA method was optimised in order to monitor exercise intensity regulation mechanisms during several ITT performed by the same athletes. This method can be interesting for coaches and athletes on the field to try to improve their exercise intensity regulation with training. Specific psychological interventions can be added to the training programs in order to help the athlete to increase their pleasure or to improve their attentional focus, allowing them to improve their exercise intensity regulation and to have a greater use of their physical capacities during ITT.

Presented by: Théo OUVARD

Supervisor: Alain GROSLAMBERT

Key words: *Cycling, Performance, Pacing strategy, Perceived exertion, Psychology, Exercise physiology.*

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENT	3
RÉSUMÉ.....	6
ABSTRACT	7
TABLE DES MATIÈRES	9
LISTE DES PUBLICATIONS.....	11
LISTE DES ABRÉVIATIONS	15
LISTE DES FIGURES.....	17
LISTE DES TABLEAUX.....	21
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	23
1. Contexte	23
2. Introduction	24
CHAPITRE 1 : Revue de littérature.....	29
1. L'étude des déterminants psychophysiologiques de la performance cycliste avant les années 2000	29
2. Les premiers modèles évoquant le rôle de la commande centrale pour l'établissement de la performance d'endurance : boucle de régulation afférente-efférente et mécanisme de téléoanticipation.....	30
3. Les nouveaux modèles psychophysiologiques de la performance d'endurance : fatigue périphérique, fatigue centrale et mécanismes explicatifs	42
4. Les modèles de la performance permettant d'expliquer les interactions entre paramètres psychologiques, perception de l'effort et contrôle de l'intensité lors d'un exercice d'endurance	58
5. Les mécanismes de régulation de l'intensité d'exercice et leur impact sur la performance d'endurance	67
6. Synthèse et objectifs de travail.....	73

CHAPITRE 2 : Analyse des mécanismes de régulation de l'intensité d'exercice lors de contre-la-montre en compétition officielle à l'aide de la nouvelle méthode « Exposure Variation Analysis »	77
CHAPITRE 3 : Déterminants psychophysiologiques de la performance cycliste lors d'un championnat national du contre-la-montre	85
CHAPITRE 4 : Influence de la répétition de montées à intensité maximale sur les mécanismes de régulation de l'effort chez des jeunes cyclistes de niveau élite.....	115
CHAPITRE 5 : Mécanismes biomécaniques et psychologiques à l'origine de l'amélioration des performances en présence d'un équipier en montée en cyclisme	141
CHAPITRE 6 : Utilisation de la méthode EVA pour le suivi de la performance et des mécanismes de régulation de l'effort lors de plusieurs contre-la-montre en cyclisme	175
1. Utilisation de la méthode EVA pour le suivi des performances lors de deux contre-la-montre réalisés sur des parcours identiques	175
2. Utilisation de la méthode EVA pour le suivi des capacités de régulation de l'effort lors de plusieurs contre-la-montre réalisés sur des parcours différents.....	180
CHAPITRE 7 : Conditions d'utilisation et mécanismes physiologiques de la relation entre performance physique et mécanismes de régulation de l'effort évalués à l'aide de la méthode EVA.....	185
1. Mécanismes physiologiques explicatifs de la relation entre performance physique et mécanismes de régulation de l'effort évalués à l'aide de la méthode EVA	185
2. Conditions d'utilisation de la méthode EVA pour le suivi de la performance et des mécanismes de régulation de l'effort en contre-la-montre	209
DISCUSSION GÉNÉRALE	215
LIMITES ET PERSPECTIVES	222
CONCLUSION GÉNÉRALE	225
BIBLIOGRAPHIE	227

LISTE DES PUBLICATIONS

Cette thèse a fait l'objet de deux articles publiés, ainsi que de deux articles actuellement en cours de soumission, dans des revues scientifiques internationales à comité de lecture :

Ouvrard, T., Gros Lambert, A., Ravier, G., Grosprêtre, S., Gimenez, P., & Grappe, F. Mechanisms of Performance Improvements Due to a Leading Teammate During Uphill Cycling. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, publié en ligne avant impression le 13 avril 2018.

Ouvrard, T., Gros Lambert, & Grappe, F. The Influence of Pleasure and Attentional Focus on Performance and Pacing Strategies in Elite Individual Time Trials. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, publié en ligne avant impression le 11 septembre 2018.

Bouillod, A., **Ouvrard, T.**, & Grappe, F. Influence of repeated uphill time trials on pacing regulation in young elite cyclists. *European Journal of Applied Physiology*, en cours de soumission.

Ouvrard, T., Pinot, J., Gros Lambert, A., et Grappe, F. Accuracy of the critical power model to monitor the level of the anaerobic reserve during professional individual time-trial. *European Journal of Applied Physiology*, en cours de soumission.

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 :

Bouillod, A., Pinot, J., Soenen, F., **Ouvrard, T.**, & Grappe, F. Dependence of the nature of the pedalling activity on maximal aerobic power in cycling. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 12(1): 44-49, 2017.

Cette thèse a également fait l'objet de neuf communications, huit communications orales et une communication affichée, au cours de congrès scientifiques nationaux et internationaux :

Communications orales :

Ouvrard, T., Gros Lambert, A., & Grappe, F. Réponses physiologiques en cyclo-cross : Etude préliminaire. 16^{ème} *Congrès International de l'ACAPS*, 26-28 octobre 2015, Nantes, France.

Ouvrard, T., & Bouillod, A. L'alimentation du cycliste de haut niveau. *Séminaire Jeunes chercheurs C3S « Autour de l'Alimentation : Pratiques, normes et représentations »*, 6 Avril 2016, Besançon, France.

Ouvrard, T., Gros Lambert, A., Pinot, J., & Grappe, F. Short and Long Individual Time-Trials Involve Intermittent Exercise Intensity Regulation. 4^{ème} *congrès international Science and Cycling*, 29-30 juin 2016, Caen, France.

Ouvrard, T. Les outils du comparatisme dans l'entraînement cycliste : des qualités différentes pour des profils différents. *Séminaire Jeunes chercheurs C3S « Autour du comparatisme »*, 22 mars 2017, Besançon, France.

Gros Lambert, A., & **Ouvrard, T.** La reconnaissance du parcours : une composante décisive de la performance en contre-la-montre. *Colloque pluridisciplinaire du laboratoire C3S « Traces et mémoires »*, 23-24 mars 2017, Besançon, France.

Ouvrard, T., Pinot, J., Gros Lambert, A., & Grappe, F. Exposure Variation Analysis (EVA) method to monitor ability to optimally regulate exercise intensity of professional cyclists during time-trial competitions. 5^{ème} *congrès international Science and Cycling*, 28-29 juin 2017, Düsseldorf, Allemagne.

Ouvrard, T., Leblond, L., Gros Lambert, A., & Grappe, F. Analyse des mécanismes de régulation mentale de l'effort dans différentes conditions en contre-la-montre. 17^{ème} *Congrès International de l'ACAPS*, 29-31 octobre 2017, Dijon, France.

Ouvrard, T. Perceptions et sensations : comment utiliser le ressenti subjectif de l'athlète pour le suivi de l'entraînement en cyclisme ? *Séminaire Jeunes chercheurs C3S « Le témoignage et son statut »*, 14 mars 2018, Besançon, France.

Ouvrard, T., Pinot, J., Gros Lambert, A., & Grappe, F. The new Exposure Variation Analysis (EVA) method to compare pacing strategy and performance during professional time-trial competitions. *6^{ème} congrès international Science and Cycling*, 4-5 juillet 2018, Nantes, France.

Communications affichées :

Ouvrard, T., Garbellotto, L., Soenen, F., & Grappe, F. Cyclo-cross Performance and Physiological/Psychological parameters. *3^{ème} congrès international Science and Cycling*, 1-2 juillet 2015, Utrecht, Pays-Bas.

Trois résumés de communications orales ont fait l'œuvre d'une publication dans des revues scientifiques internationales à comités de lecture :

Ouvrard, T., Gros Lambert, A., Pinot, J., & Grappe, F. Short and Long Individual Time-Trials Involve Intermittent Exercise Intensity Regulation. *Journal of Science and Cycling*. 5 (2): 49-50, 2016.

Ouvrard, T., Pinot, J., Gros Lambert, A., & Grappe, F. Exposure Variation Analysis (EVA) method to monitor ability to optimally regulate exercise intensity of professional cyclists during time-trial competitions. *Journal of Science and Cycling*. 6 (3): 58-59, 2017.

Ouvrard, T., Pinot, J., Gros Lambert, A., & Grappe, F. The new Exposure Variation Analysis (EVA) method to compare pacing strategy and performance during professional time-trial competitions. *Journal of Science and Cycling*, en cours de publication.

Quatre actes de séminaire ont fait l'objet d'un chapitre d'ouvrage :

Ouvrard, T., & Bouillod, A. L'alimentation du cycliste de haut niveau. in Ferréol, G. (sous la dir. de), *Autour de l'alimentation : pratiques, normes, représentations, Actes du séminaire « Jeunes chercheurs » C3S*, 97-106, 2016.

Ouvrard, T. Les outils du comparatisme dans les sciences de l'entraînement en cyclisme. in Ferréol, G., Maurice, S., Roy, J. (sous la dir. de), *Autour du comparatisme, Actes du colloque « Jeunes chercheurs » C3S*, 97-105, 2017.

Groslambert, A., & **Ouvrard, T.** La reconnaissance du parcours : une composante décisive de la performance en contre-la-montre. in Ferréol G (sous la dir. de), *Traces et mémoires*, 139-146, Louvain-la-Neuve, Editions L'Harmattan, 2018.

Ouvrard, T. L'utilisation des sensations et du ressenti pour l'entraînement du cycliste de haut-niveau. in Ferréol G (sous la dir. de), *Le témoignage et son statut, Actes du colloque « Jeunes chercheurs » C3S*, 81-89, 2018.

Enfin, les résultats de ces travaux ont également été diffusés lors de séminaires à destination des cadres techniques et des professionnels dans le champ des activités physiques et sportives :

Ouvrard, T., Groslambert, A., & Grappe, F. Explosivité et Potentiel Mental comme déterminants de la performance en cyclisme sur route. *10^{ème} Séminaire des entraîneurs et cadres techniques de la Fédération Française de Cyclisme*, 6-7 novembre 2015, Bourges, France.

LISTE DES ABRÉVIATIONS

- %_{record-PPR} : Exprimé en pourcentage du record de puissance sur la durée d'effort correspondante
- APO : Temps passé à un niveau de puissance adapté pour le maintien d'une stratégie de gestion de l'effort constante ; *Time spent at accurate power output for constant pacing strategy* (%)
- C3S : Culture, Sport, Santé, Société
- CLM : Contre-la-montre
- EVA : *Exposure Variation Analysis*
- IPO : Temps passé à un niveau de puissance empêchant de maintenir une stratégie de gestion de l'effort constante ; *Time spent at inaccurate power output for constant pacing strategy* (%)
- P_{crit} : Puissance critique (W)
- PMA : Puissance maximale aérobie
- P_{méca} : Puissance mécanique (W)
- QR : Quotient respiratoire (sans unité)
- R_T : Résistance totale à l'avancement (N)
- REG : Temps passé à réaliser de courtes régulations de l'effort ; *Short-time regulations of exercise intensity* (%)
- RPE : Perception de l'effort ; *Rating of perceived exertion*
- SC_x : Surface frontale effective (m²)
- SNC : Système nerveux central
- SRM : *Schoberer Rad Messtechnik*
- tDCS : Stimulation transcrânienne ; *Transcranial direct current stimulation*
- V : Vitesse (m·s⁻¹)
- $\dot{V}CO_2$: Rejet de dioxyde de carbone (mL·min⁻¹·kg⁻¹)
- $\dot{V}O_2$: Consommation d'oxygène (mL·min⁻¹·kg⁻¹)
- $\dot{V}O_{2max}$: Consommation maximale d'oxygène (mL·min⁻¹·kg⁻¹)
- W' : Capacité maximal de travail anaérobie (Kj)
- W'_{bal} : Niveau de consommation des réserves anaérobies (Kj)

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Schéma représentant l’articulation des différentes études menées au cours de la thèse.	28
Figure 2. Modèle global de la perception de l’effort développé par Noble et Robertson.	31
Figure 3. Représentation du système de contrôle de la commande motrice en boucle fermée d’après le modèle d’Ulmer (1996).	32
Figure 4. Modèle d’Ulmer (1996) du système de contrôle de la performance pendant l’effort.	34
Figure 5. Schéma explicatif du risque auquel s’expose l’organisme si les capacités maximales du système cardiovasculaire étaient atteintes à l’exercice (Noakes 2000).	35
Figure 6. Lactatémies (« Maximal blood lactate ») et débits cardiaques (« Peak cardiac output ») maximaux en fonction de l’altitude en situation d’hypoxie hypobare (West 1986, Reeves et coll., 1987, Noakes et coll., 2004).	36
Figure 7. Fonctionnement du Gouverneur Central pour le contrôle du recrutement musculaire à partir des feedbacks afférents en provenance du système cardiovasculaire (Noakes 2000).	38
Figure 8. Modèle psychophysiologique du Gouverneur Central pour le contrôle de l’effort.	39
Figure 9. Schéma résumé de la boucle de régulation de l’effort par le système nerveux central (« Central nervous system »).	41
Figure 10. Régulation de la commande motrice (« Motor output ») à partir des retours sensoriels (« Sensory input ») en provenance des périphéries (« Peripheral system ») vers le cerveau.	41
Figure 11. Régulation de la fatigue centrale en fonction du niveau de fatigue périphérique d’après le modèle d’Amann (Amann 2011).	44
Figure 12. Evolution du concept de seuil critique de fatigue périphérique (« critical threshold of peripheral fatigue », à gauche), vers celui de limite de tolérance sensitive (« sensory tolerance limit », à droite).	45
Figure 13. Schéma simplifié de l’interaction entre la fatigue périphérique et la fatigue centrale d’après le modèle du seuil critique de fatigue périphérique.	47
Figure 14. Représentation détaillée des différents mécanismes centraux susceptibles de réduire le niveau d’activation des motoneurones et de provoquer la fatigue centrale.	48
Figure 15. Représentation schématique du modèle psychobiologique.	50

Figure 16. Représentation simplifiée de la génération de la perception de l'effort d'après le modèle psychobiologique.....	53
Figure 17. Modèle de la chasse d'eau (Millet 2011).....	56
Figure 18. Représentation détaillée du modèle de la charge affective (Baron et coll., 2011). 59	
Figure 19. Evolution des ressentis affectifs positif (« Positive affect ») et négatif (« Negative affect ») au cours d'un contre-la-montre de 20 km chez des cyclistes effectuant un départ rapide et réalisant une meilleure performance (« FAST ») par rapport à des cyclistes adoptant une stratégie d'allure plus prudente (« SLOW ») (Renfree et coll., 2012).	61
Figure 20. Représentation graphique de l'impact du décalage temporel entre la commande motrice et la réponse afférente, à l'origine des périodes de certitude (C) et d'incertitude (U), sur la puissance développée (St Clair Gibson et coll., 2006).....	68
Figure 21. Représentation schématique des variations homéostasiques des différents paramètres physiologiques de l'organisme (a) et de leur impact sur la régulation de l'intensité d'exercice (b).....	69
Figure 22. Evolution de la perception de l'effort (« RPE ») en fonction de la distance exprimée en pourcentage de la distance totale (« Relative distance ») pour des CLM de distances différentes (De Koning et coll., 2011).....	71
Figure 23. Evolution de la perception de l'effort (« RPE ») en fonction de la distance parcourue pour un CLM de 10 km (○), un CLM de 15 km (□) et un CLM de 15 km pour lequel les sujets pensaient jusqu'à 7,5 km parcourus que le CLM ne durait que 10 km (masqué, ▲).	72
Figure 24. Analyse EVA moyenne pour trois cyclistes professionnels lors des CLM long et court du Tour de France.	80
Figure 25. Détermination des indices de temps passé à un niveau de $P_{méca}$ constant (APO), de temps passé à une $P_{méca}$ trop élevée ou trop faible par rapport à cette gestion constante de l'effort sur de longues durées (IPO) et de courtes régulations d'intensité de l'effort (REG) à partir de l'analyse EVA.	82
Figure 26. Relations entre les indices de l'analyse EVA (temps passés à APO, IPO et REG) et la $P_{méca}$ moyenne développée lors du CLM, exprimée en W ou en % _{record-PPR}	89
Figure 27. Evolution de la $P_{méca}$ développée au cours des montées 1, 2 et 3 (**, différence significative entre montée 3 et montée 1 et 2, $p < 0,001$).	118
Figure 28. Evolution des temps passés à APO, IPO et REG entre les montées 1, 2 et 3 (*, temps passé à IPO significativement différent par rapport à la montée 1 ; $p < 0,05$).	118

Figure 29. Différences moyennes (—) et inter-individuelles (○) de $P_{\text{méca}}$ moyenne développée et de vitesse moyenne entre les conditions leader et contrôle (*, significativement différent de la condition contrôle ; $p < 0,01$).	145
Figure 30. Evolution de la puissance moyenne lors de la montée en condition leader et en condition contrôle (*, différence significative entre les conditions leader et contrôle, $p < 0,05$).	146
Figure 31. Relations entre les gains de vitesse entre les deux CLM et les évolutions des temps passés à APO (a) et IPO (b).	177
Figure 32. Relations entre $\Delta_{\text{cycliste1-cycliste2}}$ de $P_{\text{méca}}$ moyenne (exprimée en %record-PPR) et $\Delta_{\text{cycliste1-cycliste2}}$ de pourcentage de temps passés à IPO (a) et APO (b).	181
Figure 33. Relations entre W' et P_{crit} et les records de puissance sur 30 s, 60 s et 60 min. ..	188
Figure 34. Profil du parcours et valeur moyenne (ligne pointillée) et écart-type (en gris) de W'_{bal} sur l'ensemble du CLM	189
Figure 35. Proposition de modèle psychophysiologique de la performance lors d'un championnat national du CLM d'après les résultats du chapitre 3.	217
Figure 36. Mécanismes psychophysiologiques impliqués dans la réalisation d'une performance cycliste de haut-niveau.	221

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Définition des différentes catégories de focus attentionnel (adapté de Brick et coll., 2014).....	65
Tableau 2. Exemple d'une matrice EVA regroupant les durées au sein des différentes zones d'intensité et de durée d'effort pour un cycliste lors du contre-la-montre initial du Tour de France 2013.	79
Tableau 3. Caractéristiques du parcours et relations entre $P_{\text{méca}}$ moyenne exprimée en $\%_{\text{record-PPR}}$ et pourcentages de temps passé à APO et IPO pour l'ensemble des 18 contre-la-montre étudiés.....	210

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1. Contexte

Avant d'évoquer les différents travaux entrepris dans le cadre de cette thèse, il convient de préciser le contexte dans lequel celle-ci a été réalisée. Tout d'abord, cette thèse a été rendue possible grâce à l'attribution par l'école doctorale « Environnement-Santé » d'un financement prenant la forme d'un contrat doctoral au laboratoire « Culture, Sport, Santé et Société » (C3S, EA 4660) de l'Upfr des Sports de Besançon, à la suite du concours des allocations de recherche de 2015. Ce contrat a ainsi permis le début de cette thèse en Octobre 2015, au sein de l'axe « Sport-Santé » du laboratoire C3S. Se positionnant comme l'un des leaders français dans la recherche sur la performance cycliste depuis les années 2000, avec pas moins de 5 thèses soutenues directement en lien avec ce sujet (Bertucci 2003, Beaulieu 2004, Duc 2005, Pinot 2014, Bouillod 2017), le laboratoire C3S apparaissait comme l'équipe idéale pour la mise en place de ces nouveaux travaux sur la performance cycliste de haut-niveau. Au plein cœur des années 2010 marquées par le bouleversement de paradigme des sciences du sports dû à l'apparition des nouveaux modèles psychophysiologiques de la performance d'endurance (Noakes *et coll.*, 2005, Marcora 2008a, Tucker 2009), la présence commune d'Alain Gros Lambert, futur directeur de thèse et spécialiste en psychologie du sport, et de Fred Grappe, principal collaborateur et « co-directeur officieux », spécialisé en physiologie et biomécanique de la performance cycliste, au sein du laboratoire offrait les perspectives d'encadrement idéales pour l'étude des déterminants psychophysiologiques de la performance cycliste de haut-niveau. Le croisement de ces regards multidisciplinaires a notamment été une ligne directrice très fortement assumée au cours de ces trois années de thèse.

A noter également que l'ensemble de ces travaux n'auraient pas pu être réalisés sans la collaboration et la bienveillance des équipes cyclistes professionnelles françaises FDJ (désormais nommée Groupama-FDJ), AG2R La Mondiale et Cofidis. Présentant depuis plusieurs années une véritable démarche d'encadrement et d'optimisation de la performance de leurs coureurs, avec notamment la présence au sein de chacune d'elle d'entraîneurs formés à l'Upfr Sports de Besançon, ces équipes n'ont pas hésité à partager des données confidentielles et à mettre à disposition certains de leurs athlètes pour permettre la bonne conduite de nos travaux. Ces dernières ont également été rejoint par l'équipe Fortunéo-Samsic, liée depuis

décembre 2017 au laboratoire C3S par une convention me permettant de réaliser une partie de mon temps de thèse en tant qu'entraîneur et expert de la performance en son sein. Si cette thèse a donc connu un déroulement et une fin quelque peu originale, elle aura cependant eu le mérite d'aboutir à une embauche avant même son terme, puisqu'à la suite de notre collaboration l'équipe Fortunéo-Samsic a décidé de m'offrir officiellement une place en son sein en tant qu'entraîné-salarié pour la saison 2019. Avant même sa soutenance, cette thèse a donc déjà remporté une première victoire, en s'assurant la réutilisation et la valorisation des connaissances produites sur le terrain dès la saison prochaine au sein du peloton cycliste professionnel.

2. Introduction

Le cyclisme est aujourd'hui l'une des disciplines les plus étudiées dans le champ des sciences du sport. De nombreux auteurs ont déjà tenté d'expliquer et de prédire la performance du coureur. Il est notamment admis depuis de nombreuses années que la vitesse de déplacement (V , en mètres par seconde, $m.s^{-1}$) d'un cycliste, et donc sa performance, est directement dépendante de la puissance mécanique développée par ses membres inférieurs ($P_{méca}$, en watts, W) et de l'ensemble des résistances qui s'opposent à son déplacement (R_T , en newtons, N), d'après la formule (Nonweiler 1956, Di Prampero *et coll.*, 1979, Martin *et coll.*, 1998, Millet *et coll.*, 2014) :

$$V = P_{méca} \cdot R_T^{-1}$$

Ainsi, si on prend l'exemple de l'épreuve la plus simple à modéliser en cyclisme sur route, à savoir le contre-la-montre (CLM) où l'athlète doit parcourir seul et le plus rapidement possible un parcours donné, pour être le plus performant possible, un cycliste doit à la fois chercher à développer la plus haute $P_{méca}$ moyenne ainsi qu'à réduire au maximum les résistances qui s'opposent à son déplacement. Si les différentes méthodes pour réduire les résistances à l'avancement ont déjà fait l'objet de nombreuses études (Bouillod 2017), ces dernières relèvent du domaine de la biomécanique appliquée au sport et ne concerne pas directement les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse. A l'inverse, tout au long de ce manuscrit, nous allons nous intéresser en détail aux différents mécanismes à l'origine de la capacité du cycliste à développer la plus haute $P_{méca}$ moyenne possible.

Depuis les années 1950 et l'apparition des premières bicyclettes ergométriques à frein mécanique, de nombreuses études ont tenté d'identifier les principaux déterminants de la performance cycliste. De par la relative facilité d'utilisation des cycloergomètres, les faibles mouvements engendrés sur le haut du corps permettant la mise en place de prélèvements invasifs, et le faible risque de blessure associé à cette pratique, l'effort cycliste est même devenu la discipline de prédilection de la majorité des chercheurs en physiologie de l'exercice. Dans la lignée de la théorie des filières énergétiques initiées par Hill (Hill et Lupton 1923, Hill *et coll.*, 1924), il a pendant très longtemps été avancé que la $P_{méca}$ développée pendant l'effort était uniquement dépendante des capacités de la filière aérobie de l'athlète. Les premières études ont notamment mis en évidence que la consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O_2max$), évaluée à partir de la mesure des échanges gazeux lors d'une épreuve incrémentale maximale, était plus élevée chez des athlètes entraînés en endurance que chez des sujets sédentaires (Saltin et Astrand 1967). Cependant, la $P_{méca}$ développée par le coureur lors d'un effort maximal dépend à la fois de son $\dot{V}O_2max$ mais également de son rendement énergétique, qui peut varier grandement entre différents athlètes (Coyle *et coll.*, 1991, Jones et Carter 2000, Lucía *et coll.*, 2002). Plusieurs études ont notamment mis en évidence que les $\dot{V}O_2max$ de cyclistes professionnels et d'athlètes amateurs n'étaient pas significativement différents (Lucia *et coll.*, 1998, Chicharro *et coll.*, 2000, Lucia *et coll.*, 2002). En conséquence, le concept de Puissance Maximale Aérobie (ou PMA), qui correspond à la $P_{méca}$ développée par l'athlète à une intensité d'effort équivalente à $\dot{V}O_2max$, a été ensuite proposé comme le principal déterminant de la performance en CLM cycliste. Des relations significatives ont notamment été identifiées entre la PMA et la performance lors de tests réalisés en laboratoire pour des populations de niveaux hétérogènes (Hawley et Noakes 1992, Pfeiffer *et coll.*, 1993, Bentley *et coll.*, 1998, Balmer *et coll.*, 2000, Tan et Aziz 2005). Ainsi, plus le cycliste aurait une PMA élevée et plus il serait capable de développer une $P_{méca}$ élevée en CLM.

Cependant, d'autres études ont montré que ces relations fortes entre PMA et performance en CLM chez des sujets hétérogènes étaient bien plus faibles voire inexistantes pour des groupes plus homogènes de cyclistes de haut-niveau (Balmer *et coll.*, 2000, Lucia *et coll.*, 2004, Impellizzeri *et coll.*, 2005). De plus, plusieurs études ont également mis en évidence que les progrès avec l'entraînement n'étaient pas systématiquement reliés à l'augmentation de la PMA (Lindsay *et coll.*, 1996, Westgarth-Taylor *et coll.*, 1997). Pour palier à ces résultats contradictoires, d'autres paramètres cardiorespiratoires peuvent être utilisés afin de prédire avec plus de précision la performance cycliste. Les courses cyclistes représentant des durées d'efforts

relativement longues (en général de 5 à 60 minutes pour les CLM et de 3,5 à 7 heures pour les courses en lignes chez les professionnels) (Jeukendrup *et coll.*, 2000, Atkinson *et coll.*, 2003, Faria *et coll.*, 2005), certains auteurs ont expliqué que la performance serait avant tout dépendante des capacités d'endurance aérobie de l'athlète, davantage que de ses capacités de puissance maximale pour cette même filière. Cette endurance aérobie a été définie comme la capacité du sportif à maintenir le pourcentage le plus élevé possible de PMA ou $\dot{V}O_2\text{max}$ pour une durée d'effort donnée (Costill *et coll.*, 1973, Péronnet *et coll.*, 1987, Peronnet et Thibault 1989, Bosquet *et coll.*, 2002). Cette endurance aérobie peut notamment être évaluée à partir des seuils lactiques ou ventilatoires lors de tests incrémentaux pour la détermination de la PMA. Si les mécanismes métaboliques à l'origine de ces seuils demeurent aujourd'hui discutés, ils illustreraient les intensités à partir desquelles ont lieu la transition entre les métabolismes aérobie et anaérobie (Svedahl et Macintosh 2003, Faude *et coll.*, 2009). Ainsi, les $P_{\text{méca}}$ auxquels interviennent ces seuils ventilatoires/lactiques seraient reliés au niveau de performance en endurance du sportif (Bosquet *et coll.*, 2002). De nombreuses études ont notamment démontré que la performance en CLM était plus fortement corrélée aux $P_{\text{méca}}$ développées à ces seuils ventilatoires/lactiques qu'à la PMA (Coyle *et coll.*, 1988, Coyle *et coll.*, 1991, Hopkins et Mckenzie 1994, Bishop *et coll.*, 1998), et en particulier chez des cyclistes professionnels (Lucia *et coll.*, 2004, Impellizzeri *et coll.*, 2005).

Les déterminants physiologiques de la performance cycliste ont donc déjà été à maintes reprises étudiés. Dans le cadre du CLM, les études ont ainsi montré que plus le coureur disposerait d'une PMA et/ou de seuils ventilatoires/lactiques élevées et plus il serait capable de développer une haute $P_{\text{méca}}$ moyenne afin d'être le plus performant possible. Cependant, les résultats de ces mêmes études menées spécifiquement auprès de cyclistes professionnels mettent en évidence que, pour ces populations d'athlètes de haut-niveau, ces relations entre les paramètres physiologiques et la performance restent relativement faibles voire inexistantes (Lucia *et coll.*, 2004, Impellizzeri *et coll.*, 2005). En conséquence, aucune étude n'est encore parvenue à ce jour à prédire avec précision la performance cycliste lors de compétitions de haut-niveau à partir de paramètres déterminés au préalable en laboratoire. Cela peut notamment s'expliquer par le fait que l'intégralité des études précédemment évoquées se sont contentées d'analyser seulement certains paramètres musculaires et/ou cardiovasculaires de manière isolée (tels que $\dot{V}O_2\text{max}$, PMA ou encore les seuils ventilatoires/lactiques...), délaissant ainsi complètement les autres facteurs susceptibles d'influencer la performance cycliste, et en particulier les paramètres

centraux à l'origine de la commande motrice. Or les nombreux modèles de l'effort d'endurance développés depuis la fin des années 1990 expliquent que la performance est directement reliée aux paramètres psychologiques de l'athlète, qui vont notamment influencer sa capacité à exploiter au mieux ses qualités physiques pendant l'exercice (Ulmer 1996, Noakes *et coll.*, 2005, Marcora 2008a, Tucker 2009, Marcora et Staiano 2010a, Baron *et coll.*, 2011, Noakes 2011). Ainsi, pour être le plus performant possible en CLM, un cycliste devra non seulement disposer de caractéristiques physiologiques, telles qu'une PMA ou des seuils ventilatoires/lactiques, très développées, mais également se trouver dans des conditions psychologiques optimales afin d'être en mesure de développer la plus haute $P_{méca}$ moyenne possible.

A la lumière de ces différents éléments, l'objectif de cette thèse est donc d'étudier les mécanismes psycho-physiologiques impliqués dans la mobilisation et la gestion des ressources nécessaires à la réalisation d'une performance de haut niveau en cyclisme sur route. L'interconnexion des régions corticales à l'origine de la commande motrice, de la perception de l'effort et des paramètres psychologiques tels que les émotions laisse supposer que les paramètres psychologiques seraient susceptibles d'influencer directement l'intensité de l'effort fourni (Baron *et coll.*, 2011). Nous émettons ainsi l'hypothèse que les paramètres psychologiques, comme le plaisir ressenti ou la gestion des pensées, influenceraient directement les mécanismes de régulation de l'effort du cycliste, qui eux-mêmes détermineraient sa capacité à exploiter au maximum son potentiel physique en compétition. Nous formulons également l'hypothèse selon laquelle les mécanismes de régulation de l'effort seraient les principaux paramètres à l'origine des variations des performances lorsque le contexte et les paramètres psychologiques diffèrent, malgré des niveaux de qualités physiques stables.

Afin de vérifier ces hypothèses, un total de huit études ont été réalisées au cours de ces 3 années de doctorat, dont quatre ont été publiées ou sont en cours de publication dans des revues scientifiques internationales à comité de lecture, et trois autres ont fait l'objet de présentations orales lors de congrès scientifiques internationaux (**Figure 1**).

Le premier chapitre de cette thèse consiste en une revue de littérature des modèles explicatifs de la performance d'endurance prenant en compte à la fois les paramètres physiologiques et psychologiques. Le chapitre 2 présente une nouvelle méthode d'analyse des variations de $P_{méca}$ pour l'étude des mécanismes de régulation de l'effort en CLM. Le chapitre 3 consiste en une première analyse conjointe des déterminants physiologiques et psychologiques de la

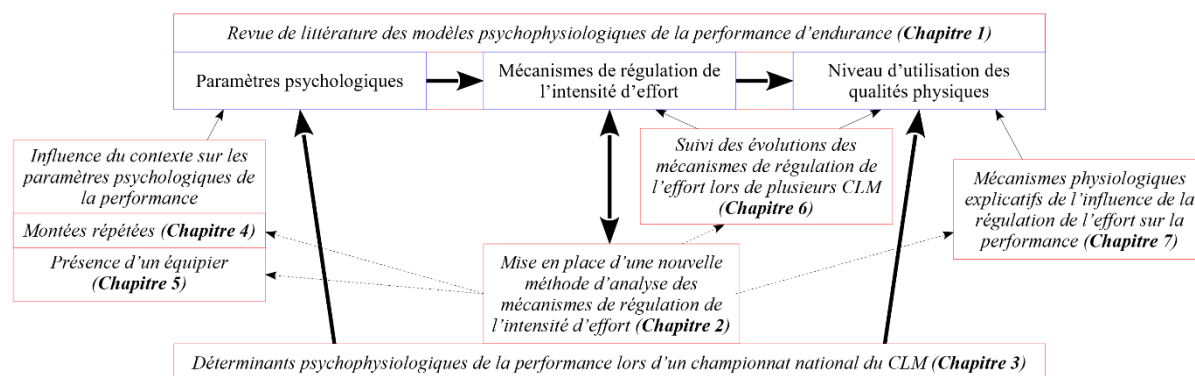


Figure 1. Schéma représentant l'articulation des différentes études menées au cours de la thèse.

CHAPITRE 1 : Revue de littérature

La revue de littérature ci-dessous présente les différents modèles psychophysiologiques permettant d'expliquer la performance cycliste de haut-niveau. Si dans un premier temps les études ayant tenté d'identifier les principaux déterminants de la performance cycliste se sont en général restreintes à un seul champ scientifique et ne se sont pas réellement appuyées sur des modèles multidisciplinaires de la performance, de nombreux modèles ont ensuite été proposés afin de comprendre les relations complexes qui lient les paramètres physiologiques et psychologiques pour l'établissement d'une performance d'endurance.

1. L'étude des déterminants psychophysiologiques de la performance cycliste avant les années 2000

Comme nous avons déjà pu le voir en introduction, de nombreuses études ont déjà tenté d'identifier les principaux déterminants de la performance cycliste. Ainsi, en ce qui concerne les caractéristiques physiologiques des athlètes, plus les cyclistes possèderaient une $\dot{V}O_2\text{max}$, une PMA ou des $P_{\text{méca}}$ aux seuils ventilatoires/lactiques élevés et plus ils seraient en mesure de développer une $P_{\text{méca}}$ moyenne importante pendant l'effort. De la même manière, même si elles sont moins nombreuses, quelques études ont tenté de relier directement certains paramètres psychologiques, et plus particulièrement l'anxiété et la confiance en soi (Mccann *et coll.*, 1992, Paquet *et coll.*, 2008), et la performance cycliste. Ainsi, plusieurs paramètres physiologiques comme psychologiques ont déjà été identifiés comme directement reliés à la performance cycliste. Cependant, les relations entre ces différents déterminants et la performance cycliste demeurent relativement faibles, et aucune de ces études n'a encore tenté d'analyser conjointement les relations entre ces paramètres physiologiques et psychologiques et la performance. Cette approche réductionniste de la performance cycliste est principalement due au modèle historique de la fatigue telle qu'étudiée dans le champ des sciences du sport pendant presque un siècle. Dès le XVIII^e siècle certains physiologistes évoquaient pourtant déjà le fait que la fatigue était tout sauf une défaillance physiologique, mais représentait au contraire un processus global complexe, dont le siège se trouvait principalement dans le cerveau et impliquant notamment les sensations du sujet (Lagrange 1889, Mosso 1890, 1896). Ces auteurs expliquaient déjà que le cerveau utiliserait cette sensation de fatigue comme un mécanisme

régulateur de l'activité physique, permettant de préserver l'organisme de toute catastrophe physiologique due à l'épuisement complet des réserves énergétiques. Cependant, les hypothèses de ces auteurs furent rapidement oubliées au profit du modèle historique et exclusivement physiologique de la fatigue instauré à la suite des travaux menés par Hill et ses collaborateurs (Hill et Lupton 1923, Hill *et coll.*, 1924). En effet, ces auteurs découvrirent à cette époque qu'à partir d'une certaine intensité d'exercice la $\dot{V}O_2$ des individus cessait d'augmenter et atteignait un plateau correspondant à $\dot{V}O_{2max}$. Ils en déduisirent ainsi que la fatigue serait liée à l'incapacité du système cardiovasculaire à apporter suffisamment de sang et donc d'oxygène aux muscles pour des intensités d'effort supérieures à $\dot{V}O_{2max}$. La contraction musculaire dans cette situation de dette d'oxygène (dite anaérobie) provoquerait l'accumulation d'acide lactique, qui limiterait les capacités de production de force des fibres musculaires. En conséquence, d'après cette théorie, l'épuisement serait uniquement la conséquence d'une défaillance physiologique lorsque les capacités maximales du système cardiovasculaire seraient atteintes, et le contrôle de l'exercice n'impliquerait ainsi aucune intervention du cerveau ou du système nerveux central (SNC). Les progrès à la suite de l'entraînement ne seraient également expliqués que par une augmentation des capacités du système cardiovasculaire, et notamment de la $\dot{V}O_{2max}$. Ce modèle demeura incontesté dans le champ des sciences du sport pendant presque un siècle (Taylor *et coll.*, 1955, Mitchell *et coll.*, 1958, Mitchell et Blomqvist 1971, Edwards 1983, Fitts 1992, 1994, Bassett et Howley 1997), et explique en grande partie les approches réductionnistes des principales études ayant tenté de prédire la performance cycliste jusqu'à présent. Ce n'est qu'à partir de la fin des années 1990 que de nouveaux modèles vont enfin dénoncer les limites de cette théorie et démontrer la nécessité de prendre en compte le SNC et la commande motrice afin de comprendre pleinement la performance sportive d'endurance.

2. Les premiers modèles évoquant le rôle de la commande centrale pour l'établissement de la performance d'endurance : boucle de régulation afférente-efférente et mécanisme de téléanticipation

Dès 1986, les premiers modèles psychophysiologiques commencèrent à être initiés, grâce aux travaux de Noble et Robertson (Noble *et coll.*, 1986, Robertson *et coll.*, 1986, Noble et Robertson 1996). Le modèle présenté par ces auteurs était extrêmement avant-gardiste pour l'époque, expliquant déjà que la perception de l'effort était l'élément-clef permettant à

l'individu de réguler sa performance, et que cette dernière dépendait non seulement des constantes physiologiques de l'individu, mais également de ses paramètres psychologiques ainsi que de son environnement. Ces auteurs évoquaient même déjà que les caractéristiques de la tâche en cours étaient interprétées par l'individu afin de réguler l'intensité d'exercice et de permettre ainsi une gestion de l'effort appropriée sur l'ensemble de l'exercice (**Figure 2**). Cependant, probablement en raison de son manque d'hypothèse concernant les liens directs entre les paramètres physiologiques, la perception de l'effort et la performance, ce modèle fut complètement délaissé par les chercheurs en sciences du sport, qui préférèrent conserver des modèles réductionnistes au détriment de cette approche globale de la performance. Il faudra attendre de nombreuses années pour que les éléments évoqués dans ce modèle ne soient petit à petit réintroduits au sein des différents modèles psychophysiologiques de la performance qui lui ont succédé.

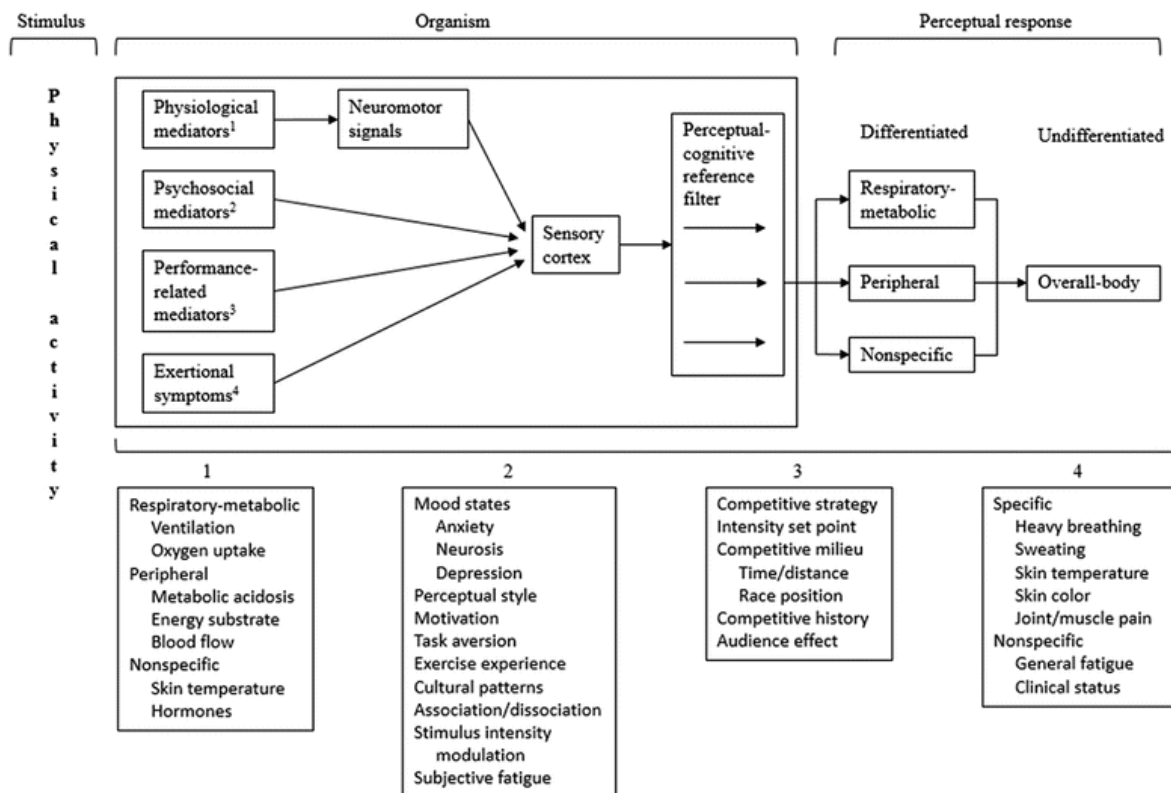


Figure 2. Modèle global de la perception de l'effort développé par Noble et Robertson.

D'après ce modèle, la perception de l'effort serait un signal extrêmement complexe, influencé notamment par les paramètres physiologiques de l'organisme (« Physiological mediators »), les paramètres psychologiques de l'individu (« Psychological mediators »), les caractéristiques du milieu (« Performance-related mediators ») et le ressenti lié à l'effort (« Exertional symptoms »). L'ensemble de ces signaux seraient intégrés par le cerveau dans le but de contrôler l'effort à partir de la réponse perceptive (« Perceptual response ») (Noble et Robertson 1996).

Il fallut attendre 1996 et les travaux d'Ulmer pour voir le premier modèle psychophysiologique de la performance ayant véritablement influencé la recherche dans le domaine des sciences du sport (Ulmer 1996). Cet auteur expliqua notamment que la performance sportive d'endurance ne pouvait pas être appréhendée exclusivement à partir de mécanismes intramusculaires et que la commande motrice régulant la contraction musculaire pendant l'effort impliquait des mécanismes très complexes. Cette commande motrice ne servirait en effet pas uniquement à définir les paramètres biomécaniques liés à l'exécution du mouvement, mais assurerait également un niveau de consommation d'énergie métabolique optimal pour la performance. Ce premier modèle se basait sur quatre systèmes en interaction, dont le rôle serait d'assurer le contrôle de l'intensité d'effort en boucle fermée tout au long de l'exercice : 1) le SNC qui émet la commande motrice efférente originale, 2) le muscle, qui interprète ce signal moteur et qui produit en réponse une contraction à l'intensité prescrite, 3) les afférences nerveuses en provenance des différents systèmes physiologiques sollicités pendant l'effort qui permettent un retour de feedbacks au SNC, et 4) l'ajustement de la réponse motrice par le SNC suite à l'intégration de ces retours afférents (**Figure 3**).

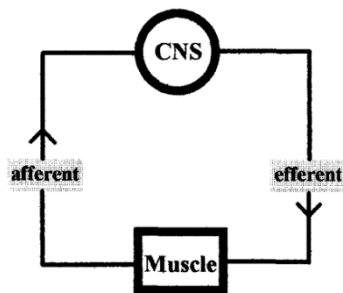


Figure 3. Représentation du système de contrôle de la commande motrice en boucle fermée d'après le modèle d'Ulmer (1996).

Au-delà de proposer l'un des premiers modèles psychophysiologiques de l'effort d'endurance, l'étude mise en place par Ulmer mis également en évidence les principales raisons pour lesquelles la prédiction de la performance se doit de nécessairement prendre en compte le rôle de la commande centrale. Ces principes essentiels représentent aujourd'hui encore certaines des bases fondamentales sur lesquelles s'appuient bon nombre des modèles psychophysiologiques qui lui ont succédé. Tout d'abord, ce modèle fut le premier à expliquer que le niveau de dépense énergétique et donc l'intensité de l'effort n'étaient pas uniquement issus de mécanismes intracellulaires, mais impliquaient nécessairement un contrôle de la part du SNC. Le retour de feedbacks afférents permettrait la régulation de l'intensité d'exercice par le SNC, à travers

l'interprétation de la perception de l'effort (RPE). Afin de tester ces hypothèses, Ulmer analysa l'évolution de la RPE en fonction de l'intensité d'exercice, notamment lors d'un effort de pédalage. Il démontra ainsi que si la RPE était directement reliée à l'intensité d'exercice, elle avait également besoin de plusieurs minutes en début d'effort afin de se stabiliser, et que cette cinétique particulière évoluait indépendamment de la fréquence cardiaque. Il en conclut ainsi que la perception de l'effort était bien utilisée par le SNC pour réguler l'intensité de l'effort, mais également que cette régulation impliquait des mécanismes très complexes nécessitant l'intégration de nombreux signaux en provenance des différents systèmes physiologiques sollicités pendant l'effort.

Cependant, Ulmer remarqua également que, même lorsque l'on demandait à des athlètes de parcourir une distance à un niveau de RPE fixe, non seulement les vitesses de course étaient élevées lors des premières minutes puis diminuaient avant d'atteindre un plateau sur la majorité de l'effort, mais ces dernières augmentaient également à nouveau dans les derniers mètres à l'approche de l'arrivée. Il en conclut donc que la gestion de l'effort devait également faire intervenir des mécanismes indépendants aux feedbacks afférents, mais directement reliés à la distance restante à parcourir. Il nomma ce mécanisme la « téléoanticipation », qui devrait permettre selon lui à un « contrôleur » ou « programmeur central », présent dans le SNC, d'estimer l'intensité d'effort optimale afin d'atteindre la ligne d'arrivée le plus rapidement possible tout en évitant un épuisement prématuré dû à un départ trop rapide. Bien que cet élément ne soit évoqué que de manière très succincte dans son article, Ulmer présenta malgré tout cette téléoanticipation comme un mécanisme physiologique fondamental nécessaire pour l'utilisation optimale des réserves énergétiques, et permettant à tout organisme, tel que par exemple les oiseaux migrateurs, d'atteindre sa destination lors d'un effort sans défaillance physiologique majeure. D'après ce modèle, l'intensité à laquelle l'athlète réalise l'effort serait donc directement déterminée par le SNC, à partir de la combinaison du mécanisme de téléoanticipation et de l'interprétation des feedbacks en provenance des muscles et des différents systèmes sollicités pendant l'effort (**Figure 4**).

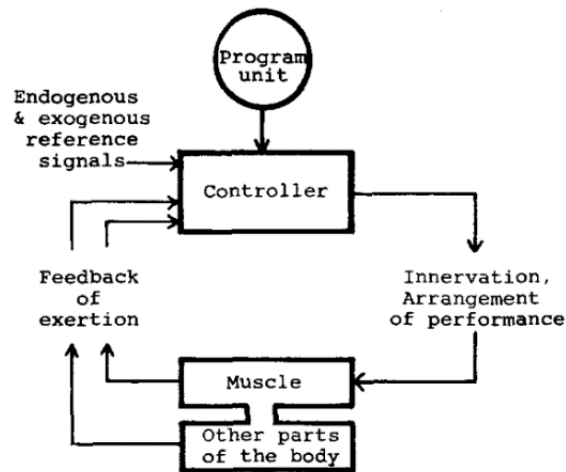


Figure 4. Modèle d'Ulmer (1996) du système de contrôle de la performance pendant l'effort.

A peu près à la même époque, Noakes fut également l'un des premiers à évoquer la nécessité de développer de nouveaux modèles psychophysiologiques de la performance d'endurance. Le raisonnement de cet auteur et de ses collaborateurs s'appuyait principalement dans un premier temps sur les limites du modèle historique de Hill précédemment présenté (Hill et Lupton 1923, Hill *et coll.*, 1924) et sur les faits inhérents à l'effort physique d'endurance que cette théorie était incapable d'expliquer (Noakes 1997, 1998, Noakes 2000, Noakes *et coll.*, 2001, Noakes *et coll.*, 2004, Tucker *et coll.*, 2004).

Tout d'abord, bien que communément admis par la majorité des spécialistes en physiologie de l'exercice, aucune étude n'est jamais parvenue à démontrer l'existence d'un plateau de débit cardiaque, et donc de $\dot{V}O_2$, à partir d'une intensité d'effort équivalente à $\dot{V}O_{2max}$ (Myers *et coll.*, 1989, Noakes 1997, 1998, Noakes 2000, Day *et coll.*, 2003, Ansley *et coll.*, 2004). Cela pourrait notamment s'expliquer par le fait que le cœur a également pour rôle d'assurer son propre approvisionnement en oxygène. En conséquence, si les capacités maximales du muscle cardiaque étaient atteintes à l'exercice, le cœur en serait la première victime, voyant son apport en oxygène limité, ce qui risquerait de provoquer une ischémie cardiaque néfaste pour la survie de l'organisme. Il semblerait donc que les capacités maximales du système cardiovasculaire ne soient jamais réellement atteintes pendant l'effort, et qu'à l'inverse, un mécanisme supérieur limiterait l'effort et préviendrait tout risque d'ischémie cardiaque (**Figure 5**) (Hill *et coll.*, 1924, Raskoff *et coll.*, 1976, Grubbström *et coll.*, 1991, Kaijser *et coll.*, 1993, Noakes 1997, 1998, Noakes 2000, Noakes *et coll.*, 2001).

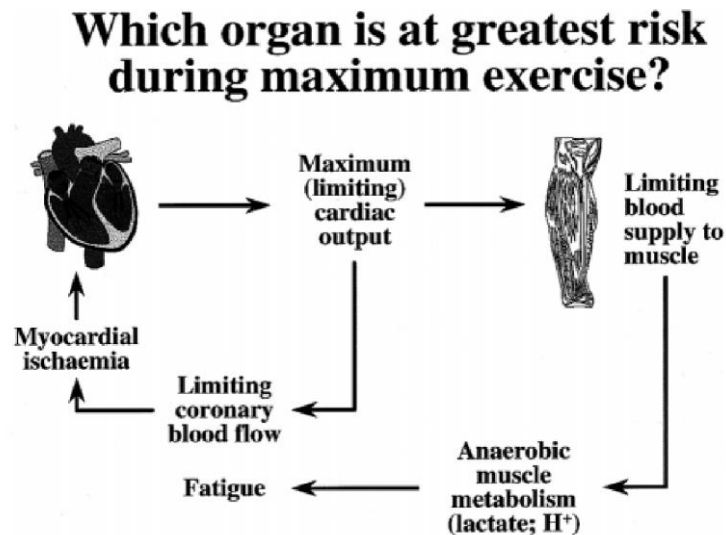


Figure 5. Schéma explicatif du risque auquel s'expose l'organisme si les capacités maximales du système cardiovasculaire étaient atteintes à l'exercice (Noakes 2000).

Si le débit cardiaque atteignait un plateau pendant l'effort (« Maximal, limiting, cardiac output »), l'approvisionnement en oxygène du cœur lui-même serait mis en péril (« Limiting coronary blood flow »), ce qui risquerait de provoquer une ischémie cardiaque (« Myocardial ischaemia ») et menacerait la survie de l'organisme.

De la même manière, aucune étude n'a jamais été en mesure de démontrer que les fibres musculaires pouvaient se trouver dans un état ischémique, hypoxique ou anaérobique lors d'un exercice maximal comme sous-maximal (Gayeski *et coll.*, 1987, Graham et Saltin 1989, Richardson *et coll.*, 1995, Hochachka et McClelland 1997, Noakes 1997, 1998, Richardson *et coll.*, 1998, Hochachka 1999, Mole *et coll.*, 1999, Richardson *et coll.*, 1999a, Richardson *et coll.*, 1999b, Noakes 2000, Richardson *et coll.*, 2001). Dans le cadre d'exercices de plus longue durée, aucune étude n'a jamais été en mesure de démontrer que les stocks de glycogène ou d'ATP intracellulaires étaient entièrement épuisés à l'arrêt de l'exercice (Green 1991, Hawley *et coll.*, 1997, Hochachka et McClelland 1997, Noakes 1997, Hochachka 1999, Mole *et coll.*, 1999, Parkin *et coll.*, 1999, Weyand *et coll.*, 1999, Noakes 2000, Gibala *et coll.*, 2002, Calbet *et coll.*, 2003b). En conséquence, il semblerait qu'aucun paramètre physiologique ne soit en mesure d'expliquer à lui seul la fatigue et l'impossibilité de l'athlète à poursuivre l'exercice. Cela se vérifie même dans des conditions extrêmes, censées accroître davantage le risque de défaillance physiologique de l'athlète. Aucune ischémie ou hypoxie, cardiaque comme musculaire, n'a jamais pu être observée en situation hypoxique sévère (hypobare comme simulée) (West 1986, Reeves *et coll.*, 1987, Suarez *et coll.*, 1987, Green *et coll.*, 1989, Kayser *et coll.*, 1994, Kayser 1996, Wagner 2000, Noakes *et coll.*, 2001, Calbet *et coll.*, 2003a). A

l'inverse, on observe même le phénomène qui a été qualifié de « lactate paradox » en hypoxie, qui montre que la lactatémie maximale diminue dans ces situations hypoxiques (**Figure 6**), et reste similaire à celle observées en condition normoxique pour des intensités d'effort absolues identiques (West 1986, Green *et coll.*, 1989, Kayser *et coll.*, 1994, Kayser 1996, Noakes *et coll.*, 2001, Noakes *et coll.*, 2004). En conséquence, l'arrêt de l'exercice ne semble pas pouvoir être expliqué exclusivement par la sollicitation excessive du métabolisme anaérobie lactique et la production d'acide lactique.

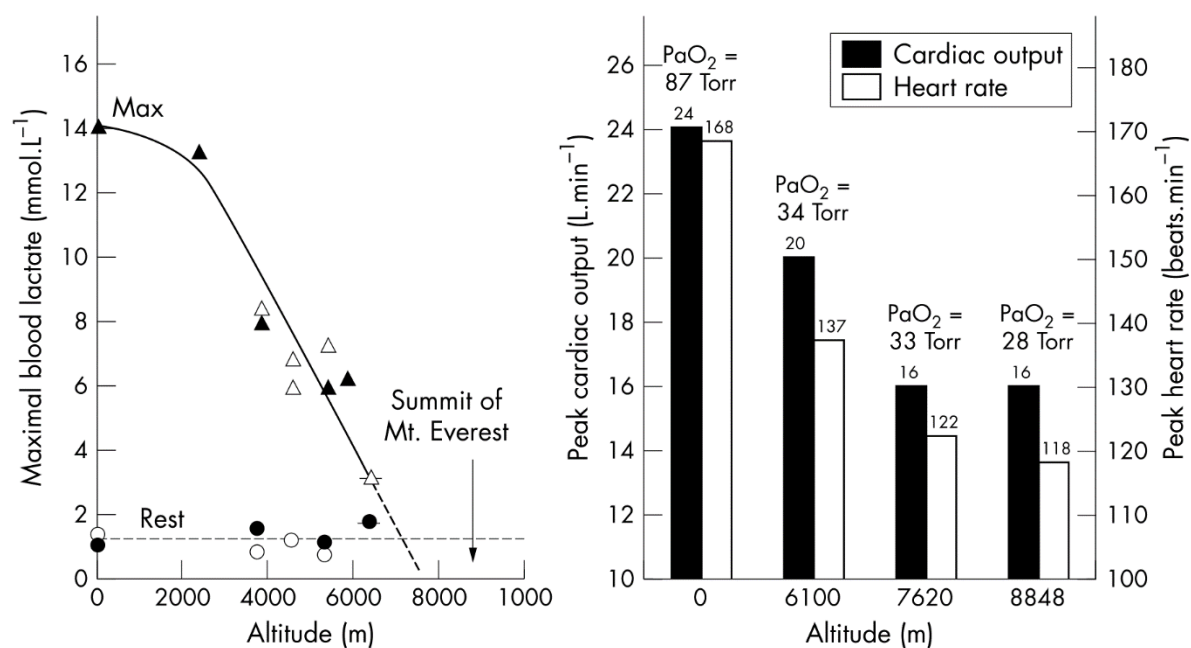


Figure 6. Lactatémies (« Maximal blood lactate ») et débits cardiaques (« Peak cardiac output ») maximaux en fonction de l'altitude en situation d'hypoxie hypobare (West 1986, Reeves *et coll.*, 1987, Noakes *et coll.*, 2004).

Ces résultats rejoignent notamment ceux réalisés sur les adaptations à l'effort observées en situation d'hyperthermie. Les études montrent que dans ces conditions hyperthermiques, aucune variable physiologique périphérique ou cardiovasculaire ne permet d'expliquer les diminutions de performance (Savard *et coll.*, 1988, Nielsen *et coll.*, 1990, Nielsen *et coll.*, 1993, Galloway et Maughan 1997, Nielsen *et coll.*, 1997). A l'inverse, cette diminution de performance serait uniquement reliée à une diminution du recrutement neuromusculaire pendant l'effort, permettant le maintien de températures corporelles similaires à celles observées pendant un effort à température normale (Tatterson *et coll.*, 2000, Kay *et coll.*, 2001, Nybo et Nielsen 2001, Tucker *et coll.*, 2004). Cette inhibition du recrutement neuromusculaire en situation d'hyperthermie rejoint également ce qui représente l'une des plus importantes

limites du modèle exclusivement physiologique de la performance d'endurance, à savoir que la commande nerveuse à l'origine du recrutement musculaire est systématiquement sous-maximale lors d'un effort en endurance, y compris à épuisement. En effet, il a été montré que le recrutement neuromusculaire pendant un effort d'endurance ne dépasse jamais les 80 % d'unités motrices recrutées, y compris à l'épuisement (Sloniger *et coll.*, 1997a, 1997b, St Clair Gibson *et coll.*, 2001). A l'inverse, la diminution des performances avec la fatigue est même illustrée par une diminution de ce recrutement neuromusculaire (Bigland-Ritchie 1981, Hakkinen 1993, Peltonen *et coll.*, 1997, Gandevia 2001, Kay *et coll.*, 2001, St Clair Gibson *et coll.*, 2001). Or si la fatigue était exclusivement dépendante de mécanismes périphériques provoquant l'incapacité des fibres musculaires à se contracter correctement, il n'y aurait aucune raison valable pour que certaines fibres musculaires restent inactives, et au contraire ne soient pas sollicitées afin de limiter la perte de force due à cette fatigue périphérique (Noakes *et coll.*, 2001, St Clair Gibson *et coll.*, 2001, Tucker *et coll.*, 2004).

Enfin, les variations observées dans la gestion de l'effort (i.e. la distribution de l'intensité d'effort consentie tout au long de l'exercice, également appelée stratégie de gestion de l'allure ou « pacing strategy ») démontrent une nouvelle fois que l'effort n'est pas uniquement régulé par l'accumulation d'acide lactique ou toute modification d'état physiologique. Le phénomène du « end-spurt » notamment, qui correspond à l'accélération systématiquement observée dans les derniers 10 % de la durée d'effort de toute épreuve autorégulée par l'athlète (ou « self-paced ») (Tucker *et coll.*, 2004, St Clair Gibson *et coll.*, 2006), s'oppose fortement à ces hypothèses. En effet, si la performance était exclusivement limitée par l'accumulation de métabolites périphériques avec la fatigue, il serait impossible à l'athlète d'augmenter le niveau d'effort produit en fin d'exercice, alors que la fatigue et le niveau de perturbation physiologique sont maximaux (Kay *et coll.*, 2001, Tucker *et coll.*, 2004). En conséquence, l'ensemble de ces limites mettent en évidence que le SNC joue nécessairement un rôle central dans la performance d'endurance, en régulant l'intensité d'exercice à partir de l'ajustement du recrutement neuromusculaire. Le modèle du Gouverneur Central, tel que défini par Noakes et ses collègues (Noakes 2000, Noakes *et coll.*, 2001, St Clair Gibson *et coll.*, 2001), explique que le SNC régulerait l'effort en boucle fermée, ajustant le signal moteur efférent émis après intégration des feedbacks afférents en provenance des différents systèmes physiologiques sollicités pendant l'effort tels que les muscles ou le cœur (**Figure 7**). Ce rôle clef du SNC dans la régulation de la performance d'endurance expliquerait notamment pourquoi les paramètres

physiologiques tels que $\dot{V}O_{2\max}$ ou les seuils lactiques/ventilatoires ne permettraient pas de prédire avec précision la performance chez des athlètes de haut-niveau (Noakes 2000).

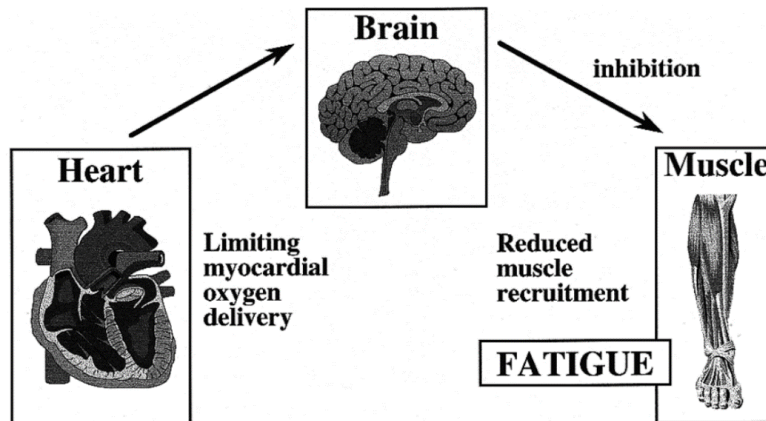


Figure 7. Fonctionnement du Gouverneur Central pour le contrôle du recrutement musculaire à partir des feedbacks afférents en provenance du système cardiovasculaire (Noakes 2000).

Les signaux en provenance des périphéries, telle que l'atteinte des capacités maximales du cœur (« Heart », « Limiting myocardial oxygen delivery »), seraient intégrés par le cerveau (« Brain »), afin de provoquer la fatigue et l'inhibition du recrutement musculaire (« Reduced muscle recruitment ») avant tout dommage physiologique majeur.

Cependant, les premiers articles de ces auteurs à l'origine de ce modèle ne détaillèrent aucunement les mécanismes impliqués dans cette régulation centrale de l'effort (Noakes 1997, 1998, Noakes 2000, Noakes *et coll.*, 2001, St Clair Gibson *et coll.*, 2001). Ce n'est qu'à partir de 2004 que ce modèle psychophysiologique a commencé à réellement se structurer, à partir des constatations faites concernant les stratégies de gestion de l'effort observées pendant un exercice d'endurance autorégulé (Noakes et St Clair Gibson 2004, St Clair Gibson et Noakes 2004, Tucker *et coll.*, 2004, Lambert *et coll.*, 2005, Noakes *et coll.*, 2005). Trois éléments clefs caractériseraient notamment ces stratégies de gestion de l'effort : 1) une intensité quasi-optimale est adoptée par les athlètes dès les premiers instant de l'effort, et ce avant même que le moindre paramètre physiologique n'ait atteint un niveau stable, 2) l'intensité d'effort ne reste pas constante, et de nombreux ajustements et oscillations sont observables tout au long de l'exercice, et 3) un end-spurt est systématiquement observable dans les derniers 10 % de la durée d'effort, provoquant une augmentation significative de l'intensité de l'effort à l'approche de la fin de l'exercice (Noakes et St Clair Gibson 2004, St Clair Gibson et Noakes 2004, Tucker *et coll.*, 2004, Lambert *et coll.*, 2005, Noakes *et coll.*, 2005). En conséquence, le modèle du

gouverneur central explique que ces trois éléments ne sont possibles que si deux mécanismes essentiels issus du cerveau permettent la régulation de l'effort au cours d'une épreuve d'endurance : 1) la téléoanticipation, tel que déjà défini par Ulmer (1996), qui serait le mécanisme par lequel le cerveau déterminerait une intensité supposée optimale pour la durée d'effort restante à réaliser, et qui expliquerait pourquoi la régulation de l'effort se met en place dès les premiers instants de l'exercice avant même que les différents systèmes physiologiques aient eu le temps d'atteindre un niveau stable, ainsi que pourquoi l'athlète est en mesure d'augmenter l'intensité d'exercice lorsque la durée d'effort restante est réduite (Noakes et St Clair Gibson 2004, St Clair Gibson et Noakes 2004, Tucker *et coll.*, 2004, Lambert *et coll.*, 2005, Noakes *et coll.*, 2005), et 2) la boucle visant à préserver l'homéostasie à partir de l'ajustement de la commande motrice efférente en fonction de l'intégration des signaux nerveux afférents, qui serait à l'origine des multiples ajustements d'intensité d'effort tout au long de l'exercice (Noakes et St Clair Gibson 2004, St Clair Gibson et Noakes 2004, Tucker *et coll.*, 2004, Lambert *et coll.*, 2005, Noakes *et coll.*, 2005). La combinaison de ces deux mécanismes essentiels permettrait ainsi le contrôle de l'effort lors de toute performance d'endurance (**Figure 8**).

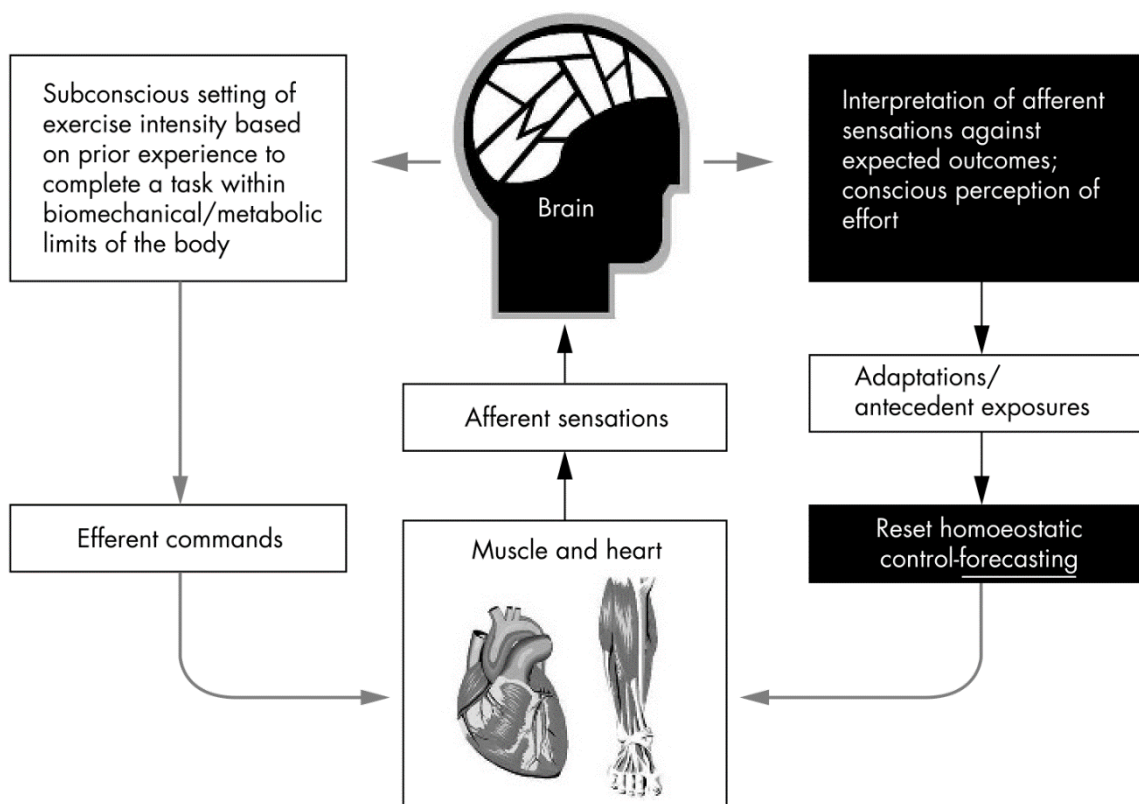


Figure 8. Modèle psychophysiologique du Gouverneur Central pour le contrôle de l'effort.

L'intensité d'exercice serait basée sur la combinaison de l'intensité d'effort supposée optimale au regard du temps d'effort restant (« Subconscious setting of exercise intensity based prior experience to complete a task within biomechanical/metabolic limits of the body ») et de l'interprétation des sensations issues des signaux afférents revenant des différentes périphéries (« Interpretation of afferent sensations against expected outcomes; conscious perception of effort ») (Lambert et coll., 2005).

Ce modèle du Gouverneur Central fut ainsi l'un des premiers à remettre la commande centrale au cœur de la performance d'endurance, et à tenter d'identifier les mécanismes inhérents au contrôle de l'intensité d'exercice par le cerveau. Cependant, les mécanismes neuro-perceptifs à l'origine de cette régulation de l'effort ne restèrent que très superficiellement abordés par ces auteurs. Il fut simplement évoqué, sur la base des travaux réalisés en neurosciences, que la boucle de régulation de l'effort pour le maintien de l'homéostasie serait permise par la remontée depuis les périphéries des afférences de type III et IV vers le cortex moteur, et notamment vers la moelle épinière (Hayward *et coll.*, 1988, Bongiovanni et Hagbarth 1990, Garland et Kaufman 1995, Pettorossi *et coll.*, 1999, St Clair Gibson et Noakes 2004) et les régions corticales supérieures telles que le cortex préfrontal ou le cortex cingulaire (Gandevia *et coll.*, 1996, Gandevia 1998, Gandevia 1999, Taylor *et coll.*, 2000a, Taylor *et coll.*, 2000b, St Clair Gibson et Noakes 2004), afin de réguler directement la commande motrice efférente. Ces afférences III et IV remonteraient également vers des régions telles que l'hypothalamus afin de réguler le système endocrinien pour permettre l'ajustement de la glycémie et du niveau d'activité du système nerveux sympathique (Weltan *et coll.*, 1998, Vissing 2000, Lambert *et coll.*, 2005). Il fut également évoqué que l'intensité de l'effort et la fatigue seraient issues de l'équilibre entre les différentes influences facilitatrices et inhibitrices reçues par le cortex moteur (Noakes 2012, Tanaka et Watanabe 2012) (**Figure 9**). L'interconnexion des régions cérébrales du cortex moteur principal, des ganglions de la base (Dettmers *et coll.*, 1996, Chaudhuri et Behan 2000, Korotkov *et coll.*, 2005), du thalamus (Dettmers *et coll.*, 1996, Korotkov *et coll.*, 2005), du cortex orbitofrontal (Liu *et coll.*, 2007), du cortex préfrontal (Dettmers *et coll.*, 1996, Liu *et coll.*, 2003, Korotkov *et coll.*, 2005, Liu *et coll.*, 2007, Post *et coll.*, 2009), du cortex cingulaire antérieur (Dettmers *et coll.*, 1996, Liu *et coll.*, 2003, Korotkov *et coll.*, 2005, Liu *et coll.*, 2007, Post *et coll.*, 2009), de l'aire prémotrice, et de l'aire motrice supplémentaire (Dettmers *et coll.*, 1996, Johnston *et coll.*, 2001, Liu *et coll.*, 2003, Korotkov *et coll.*, 2005, Post *et coll.*, 2009) formerait une boucle facilitatrice susceptible d'augmenter la commande motrice et donc l'effort fourni (Taylor et Gandevia 2008, Tanaka et Watanabe 2012). A l'inverse, les remontées afférentes III et IV seraient intégrées par la moelle épinière, puis par le thalamus, le cortex somatosensoriel secondaire, le cortex insulaire médial, le cortex cingulaire postérieur, le cortex

cingulaire antérieur, l'aire prémotrice et enfin par l'aire motrice supplémentaire ce qui aboutirait à une influence inhibitrice sur le cortex moteur principal, à l'origine de la diminution de la commande centrale efférente avec la fatigue (**Figure 10**) (Noakes 2012, Tanaka et Watanabe 2012). L'intégration en direct et incessante de ces signaux facilitateurs et inhibiteurs serait ainsi à l'origine des ajustements constants d'intensité d'exercice au cours d'une épreuve autorégulée.

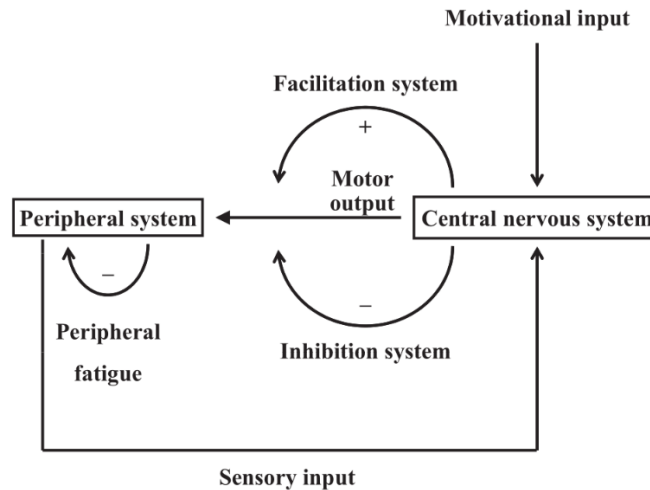


Figure 9. Schéma résumé de la boucle de régulation de l'effort par le système nerveux central (« Central nervous system »).

La commande motrice (« Motor output») serait dépendante du niveau de motivation (« Motivational input») et de l'addition des influences facilitatrices (« Facilitation system») et inhibitrices (« Inhibition system») sur le cortex moteur provoquées par les remontées sensorielles afférentes (« Sensory input») en provenance des périphéries (« Peripheral system») (Tanaka et Watanabe 2012).

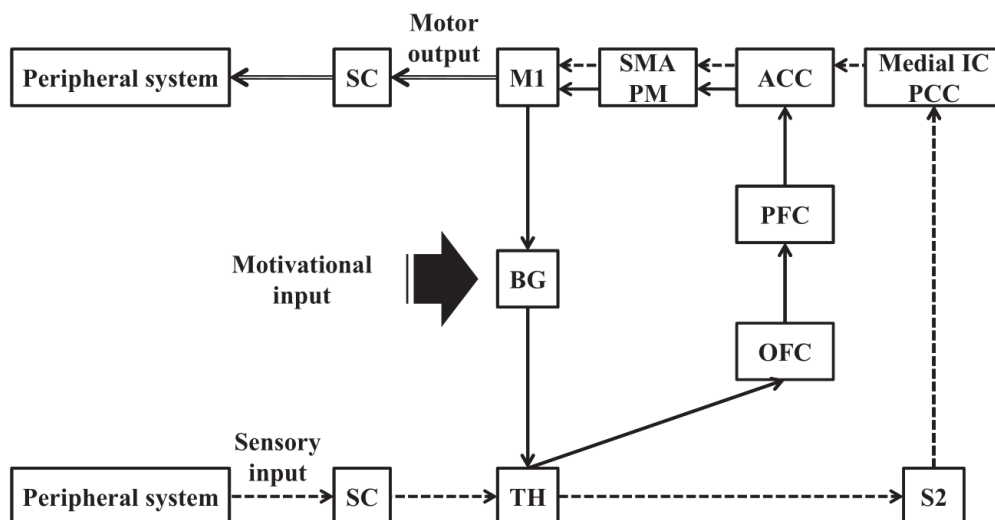


Figure 10. Régulation de la commande motrice (« Motor output») à partir des retours sensoriels (« Sensory input») en provenance des périphéries (« Peripheral system») vers le cerveau.

Avec la fatigue, le retour afférent va notamment provoquer l'activation d'une boucle inhibitrice (flèches en pointillé) entre la moelle épinière (SC), le thalamus (TH), le cortex somatosensoriel secondaire (S2), le cortex insulaire médial (« Medial IC »), le cortex cingulaire postérieur (PCC), le cortex cingulaire antérieur (ACC), l'aire prémotrice (PM), l'aire motrice supplémentaire (SMA) et le cortex moteur principal (M1) à l'origine d'une diminution de la commande motrice émise par la moelle épinière. A l'inverse, une boucle facilitatrice (flèches continues) peut également être activée, notamment de part une augmentation de la motivation (« Motivational input »), entre les ganglions de la base (BG), TH, le cortex orbitofrontal (OFC), le cortex préfrontal (PFC), ACC, et PM, afin d'augmenter l'activité du cortex moteur principal et donc la commande motrice émise (Tanaka et Watanabe 2012).

Ainsi, la boucle de régulation de l'homéostasie à partir de l'ajustement de la commande motrice pourrait bien être localisable au sein du cerveau. En revanche, aucune étude n'a pour le moment été en mesure de démontrer l'existence dans le cerveau d'une aire susceptible de gérer spécifiquement le mécanisme de téléanticipation. De la même manière, cette boucle de régulation ne permet à aucun moment de comprendre comment les paramètres psychologiques vont être en mesure d'influencer l'intensité d'exercice et la performance. En conséquence, si ce modèle du gouverneur central a été le premier à démontrer l'importance du cerveau dans la performance d'endurance et à mettre en évidence la nécessité de modèles explicatifs psychophysiologiques, il a ensuite été confronté à de nouveaux modèles concurrentiels qui se sont développés afin de répondre à ces différentes limites (Marcora 2008a, Inzlicht et Marcora 2016).

3. Les nouveaux modèles psychophysiologiques de la performance d'endurance : fatigue périphérique, fatigue centrale et mécanismes explicatifs

L'un des premiers modèles concurrents au modèle du gouverneur central à intégrer également la commande centrale comme un élément-clef de la performance fut le modèle développé par Amann et ses collègues à partir des années 2006 (Amann *et coll.*, 2006a, Amann et Dempsey 2008, Amann et Kayser 2009, Amann 2011, Hureau *et coll.*, 2018). Principalement défendu par des chercheurs en physiologie cardiaque ou respiratoire, ce modèle se développa dans un premier temps en opposition à celui du gouverneur central, dans le but de démontrer que les paramètres métaboliques, cardiovasculaires et respiratoires jouaient bien un rôle essentiel pour limiter la performance lors d'un effort d'endurance (Amann *et coll.*, 2006a, Amann *et coll.*, 2006b, Amann *et coll.*, 2007a, Amann *et coll.*, 2007b, Katayama *et coll.*, 2007, Romer *et coll.*, 2007, Amann et Dempsey 2008, Amann *et coll.*, 2008a, Dempsey *et coll.*, 2008, Taylor et

Romer 2008, Amann et Kayser 2009, Amann et Secher 2010a). Cependant, ces auteurs reconnaissent également assez rapidement que le SNC jouait tout autant un rôle majeur dans la performance d'endurance, ayant pour objectif d'arrêter l'effort à l'épuisement avant toute perturbation physiologique majeure afin de préserver l'homéostasie de l'organisme (Amann *et coll.*, 2006a, Amann *et coll.*, 2006b, Amann *et coll.*, 2007b, Amann et Dempsey 2008, Amann *et coll.*, 2008a, Amann *et coll.*, 2008b, Amann et Kayser 2009, Amann 2011). D'après ces auteurs, l'effort et la performance d'endurance seraient donc limités par deux éléments essentiels en interaction : 1) la fatigue périphérique, provoquée par l'accumulation de métabolites (et plus particulièrement les phosphates inorganiques Pi et les ions hydrogènes H⁺) (Hogan *et coll.*, 1999, Allen *et coll.*, 2008, Light *et coll.*, 2008) qui limiterait les capacités contractiles de la fibre musculaire, et 2) la fatigue centrale, qui limiterait la commande motrice efférente à l'épuisement (Bigland-Ritchie *et coll.*, 1978, Gandevia *et coll.*, 1996, Gandevia 1998, Gandevia 1999, 2001, Amann et Dempsey 2008, Amann *et coll.*, 2008b, Amann *et coll.*, 2009, Amann 2011, Amann *et coll.*, 2011, Amann *et coll.*, 2015, Taylor *et coll.*, 2016, Hureau *et coll.*, 2018). L'élément-clef qui relierait ces deux types de fatigue serait le concept de seuil critique de fatigue périphérique (ou « critical threshold of peripheral fatigue ») (Amann *et coll.*, 2006a, Amann et Dempsey 2008, Amann *et coll.*, 2008b, Amann et Secher 2010b, Amann 2011, 2012, Hureau *et coll.*, 2014), qui sera également repris plus tard sous le nom de limite de tolérance sensitive (ou « sensory tolerance limit ») (Gandevia 2001, Rossman *et coll.*, 2012, Hureau *et coll.*, 2018). En effet, ce modèle suppose que pour compenser la perte de force due à l'augmentation de la fatigue périphérique, le SNC doit augmenter la commande motrice efférente (Amann et Dempsey 2008, Hureau *et coll.*, 2018). Cependant, de nombreuses études ont également mis en évidence que pour tout type d'effort réalisé, le niveau de fatigue périphérique maximal à épuisement était en général similaire et n'excédait jamais un niveau susceptible de représenter une menace pour le maintien de l'homéostasie (Hogan *et coll.*, 1999, Duhamel *et coll.*, 2004, Sandiford *et coll.*, 2005, Amann *et coll.*, 2006a, Amann *et coll.*, 2007b, Amann et Dempsey 2008, Amann et Kayser 2009, Gagnon *et coll.*, 2009, Burnley *et coll.*, 2010, Duffield *et coll.*, 2010, Amann 2011, Chidnok *et coll.*, 2013, Hureau *et coll.*, 2014, Hureau *et coll.*, 2016, Hureau *et coll.*, 2018). En conséquence, il semblerait que le SNC régulerait le niveau de commande motrice afin d'éviter que la fatigue périphérique n'atteigne un seuil critique susceptible de provoquer des dommages physiologiques majeurs (Gandevia 2001, Amann *et coll.*, 2006a, Amann *et coll.*, 2008b, Amann et Kayser 2009, Amann et Secher 2010b, Amann 2011, Rossman *et coll.*, 2012, Hureau *et coll.*, 2014, Hureau *et coll.*, 2016, Hureau *et coll.*, 2018). Ce mécanisme de régulation serait à l'origine de la fatigue centrale qui limiterait

l'effort à l'épuisement. Ainsi d'après ce modèle, comme pour le modèle du gouverneur central, la diminution de la commande centrale par le SNC représenterait un mécanisme majeur de la fatigue et de la performance en endurance. Cependant, cette fatigue centrale serait également directement liée au niveau de fatigue périphérique issue des perturbations physiologiques induites pendant l'effort dans le milieu musculaire (**Figure 11**) (Amann 2011, Hureau *et coll.*, 2014, Hureau *et coll.*, 2016, Hureau *et coll.*, 2018).

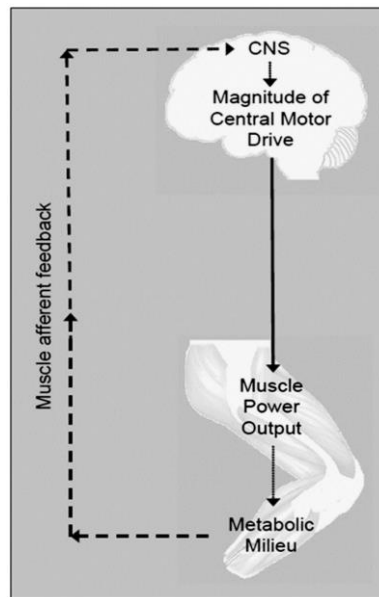


Figure 11. Régulation de la fatigue centrale en fonction du niveau de fatigue périphérique d'après le modèle d'Amann (Amann 2011).

Le système nerveux central (« CNS ») régulerait la commande motrice (« Magnitude of Central Motor Drive ») vers les muscles en fonction du niveau de fatigue périphérique présent dans le milieu intramusculaire (« Metabolic Milieu »).

Le concept de seuil critique de fatigue périphérique a été un temps remis en cause par les études qui ont démontré que l'épuisement pouvait malgré tout survenir à des niveaux d'accumulation de métabolites et de fatigue périphérique plus réduits, et donc inférieurs à un potentiel seuil critique de fatigue périphérique (Harms *et coll.*, 1997, Sandiford *et coll.*, 2005, Romer *et coll.*, 2006, Amann *et coll.*, 2007a, Amann *et coll.*, 2007b, Taylor et Romer 2008, Amann *et coll.*, 2013, Wüthrich *et coll.*, 2013, Amann *et coll.*, 2015, Johnson *et coll.*, 2015, Thomas *et coll.*, 2015, Thomas *et coll.*, 2016, Hureau *et coll.*, 2018). Cependant, ces épuisements prématurés lors de ces études étaient soit liés à une pré-fatigue au niveau d'autres groupes musculaires (au niveau des membres supérieurs ou des muscles respiratoires), soit dues à des contraintes environnementales susceptibles d'accroître le risque de nuire à l'homéostasie de l'organisme (telles que des conditions hypoxiques ou hyperthermiques) (Harms *et coll.*, 1997, Nordsborg *et*

coll., 2003, Noakes *et coll.*, 2004, Sandiford *et coll.*, 2005, Romer *et coll.*, 2006, Amann *et coll.*, 2007a, Amann *et coll.*, 2007b, Taylor et Romer 2008, Amann 2011, Amann *et coll.*, 2013, Wüthrich *et coll.*, 2013, Amann *et coll.*, 2015, Broxterman *et coll.*, 2015, Johnson *et coll.*, 2015, Thomas *et coll.*, 2016, Hureau *et coll.*, 2018). En conséquence, Amann et ses collègues ont ajusté leur concept de seuil critique de fatigue périphérique pour celui de limite de tolérance sensitive (Rossman *et coll.*, 2012, Broxterman *et coll.*, 2015, Hureau *et coll.*, 2018). Ce nouveau concept définit que ce ne serait pas uniquement le retour afférent en provenance des groupes musculaires sollicités pendant l'effort qui serait intégré par le SNC et à l'origine de la fatigue centrale, mais l'ensemble des afférences en provenance de tous les systèmes physiologiques de l'organisme, y compris les groupes musculaires non-sollicités pendant l'effort, les muscles inspiratoires, ou le système cardiovasculaire (**Figure 12**) (St Clair Gibson et Noakes 2004, Amann *et coll.*, 2006a, Amann *et coll.*, 2007b, Amann et Kayser 2009, Dempsey *et coll.*, 2014, Rossman *et coll.*, 2014, Broxterman *et coll.*, 2015, Hureau *et coll.*, 2018). Le SNC s'assurerait ainsi que le niveau de perturbation physiologique de l'ensemble de l'organisme ne dépasse pas un niveau limite qui pourrait représenter une menace pour l'équilibre homéostatique global de l'organisme.

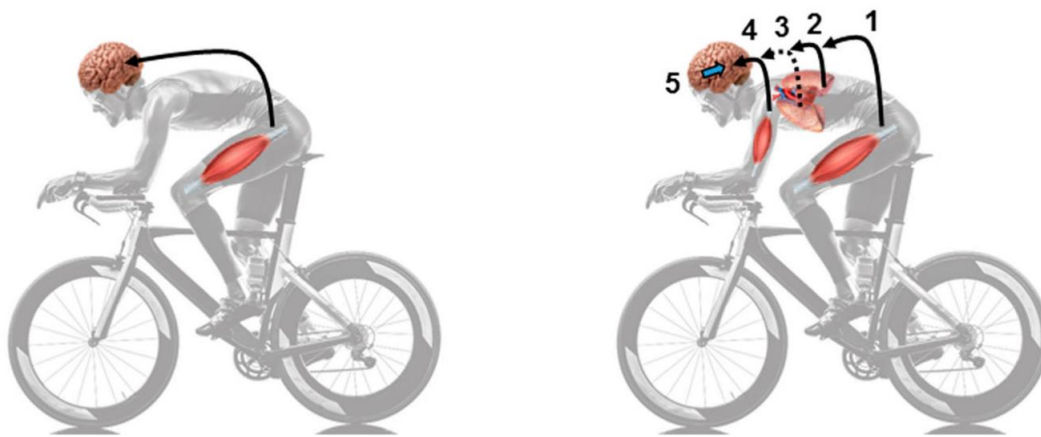


Figure 12. Evolution du concept de seuil critique de fatigue périphérique (« critical threshold of peripheral fatigue », à gauche), vers celui de limite de tolérance sensitive (« sensory tolerance limit », à droite).

D'après ce dernier, la perception de l'effort n'est plus uniquement dépendante des feedbacks afférents en provenance des muscles sollicités pendant l'effort (1), mais également des retours afférents en provenance de l'ensemble des systèmes physiologiques de l'organisme (tels que les muscles inspiratoire, 2, le système cardiovasculaire, 3, et les autres groupes musculaires non-sollicités pendant l'effort, 4). D'autres éléments issus du cerveau, tels que les paramètres psychologiques ou la décharge corolaire générée suite à la commande motrice, peuvent également venir influencer cette perception de l'effort et le développement de la fatigue centrale (5) (Hureau *et coll.*, 2018).

Les afférences nerveuses de type III et IV seraient d'après ce modèle les éléments-clefs de cette régulation de l'effort et du développement de la fatigue centrale. Non seulement ces afférences seraient à l'origine des adaptations cardiovasculaires et respiratoires qui se mettent en place dès les premières minutes d'exercice, mais elles seraient également à l'origine de la perception de l'effort et en conséquence de la fatigue centrale qui limiterait la commande motrice à l'épuisement (Kaufman *et coll.*, 2002, Light *et coll.*, 2008, Taylor et Gandevia 2008, Amann *et coll.*, 2010, Amann et Secher 2010b, Amann 2011, Amann *et coll.*, 2011, Enoka *et coll.*, 2011, Amann 2012, Dempsey *et coll.*, 2014, Amann et Light 2015, Amann *et coll.*, 2015, Blain *et coll.*, 2016, Taylor *et coll.*, 2016, Hureau *et coll.*, 2018). Ce rôle clef pour la régulation de l'effort des afférences III et IV fut notamment confirmé par les études ayant démontré qu'à la suite de l'inhibition pharmacologique de ces remontées afférentes, les sujets seraient en mesure de produire un effort plus intense, générant ainsi un niveau de perturbation métabolique supérieur au seuil de fatigue périphérique ou à la limite de tolérance sensitive (Amann *et coll.*, 2008b, Amann *et coll.*, 2009, Amann *et coll.*, 2010, Amann 2011, Amann *et coll.*, 2011, Amann 2012, Gagnon *et coll.*, 2012, Sidhu *et coll.*, 2014, Blain *et coll.*, 2016).

Les afférences III et IV remonteraient ainsi les informations concernant l'ensemble des systèmes physiologiques pendant l'effort jusqu'à la moelle épinière. L'ensemble de ces signaux seraient ensuite intégrés par le cerveau pour générer la perception de l'effort, qui serait à l'origine de la fatigue centrale, inhibant la commande motrice efférente lorsque la limite de tolérance sensitive est atteinte (Taylor et Gandevia 2008, Amann 2012, Taylor *et coll.*, 2016). En revanche, les aires du cerveau influencées par ces remontées afférentes et donc à l'origine de cette perception de l'effort et de la fatigue centrale restent majoritairement méconnues (Amann 2012, Taylor *et coll.*, 2016). Cependant, cette intégration des afférences III et IV par le SNC se rapprochant de la boucle afférente-efférente déjà évoquée par le modèle du gouverneur central, il est également possible de supposer que, comme pour ce dernier, les afférences III et IV pourraient, soit inhiber directement le cortex moteur et être ainsi à l'origine de la diminution de la commande motrice (Taylor et Gandevia 2008, Sidhu *et coll.*, 2009, Enoka *et coll.*, 2011), soit être intégrées par d'autres aires cérébrales concurrentes à l'origine d'une boucle d'inhibition dans le cerveau aboutissant également à la diminution de la commande issue du cortex moteur (**Figure 13**) (Taylor *et coll.*, 2000a, Hilty *et coll.*, 2011, Amann 2012, Tanaka et Watanabe 2012, Amann *et coll.*, 2015, Sidhu *et coll.*, 2017). Cette boucle inhibitrice pourrait également être liée à une modification de l'activité des neurotransmetteurs (et notamment de la sérotonine monoamine, de la dopamine et de la noradrénaline) (Newsholme 1987, Laporte et

coll., 1996, Roelands *et coll.*, 2008, Roelands et Meeusen 2010, Klass *et coll.*, 2012, Cotel *et coll.*, 2013, Perrier *et coll.*, 2013, Johnson et Heckman 2014, Sharples *et coll.*, 2014, D'amico *et coll.*, 2015) qui pourrait inhiber l'activité du cortex ou limiter ses influences facilitatrices (Taylor *et coll.*, 2016), à une fatigue supra-spinale limitant la stimulation du cortex moteur (Duchateau et Hainaut 1993, Gandevia *et coll.*, 1996, Peters et Fuglevand 1999, Pettorossi *et coll.*, 1999, Martin *et coll.*, 2006, Taylor *et coll.*, 2006, Hilty *et coll.*, 2011, Taylor *et coll.*, 2016, Sidhu *et coll.*, 2017), ou encore à l'altération des propriétés intrinsèques des motoneurones due à leur activation répétée (**Figure 14**) (Brownstone 2006, Taylor et Gandevia 2008, Mcneil *et coll.*, 2009, Mcneil *et coll.*, 2011, Heckman et Enoka 2012, Taylor *et coll.*, 2016). Cependant, l'ensemble de ces phénomènes demeurent aujourd'hui méconnus et leur impact réel sur la fatigue et la performance d'endurance nécessite encore d'être étudié plus en profondeur.

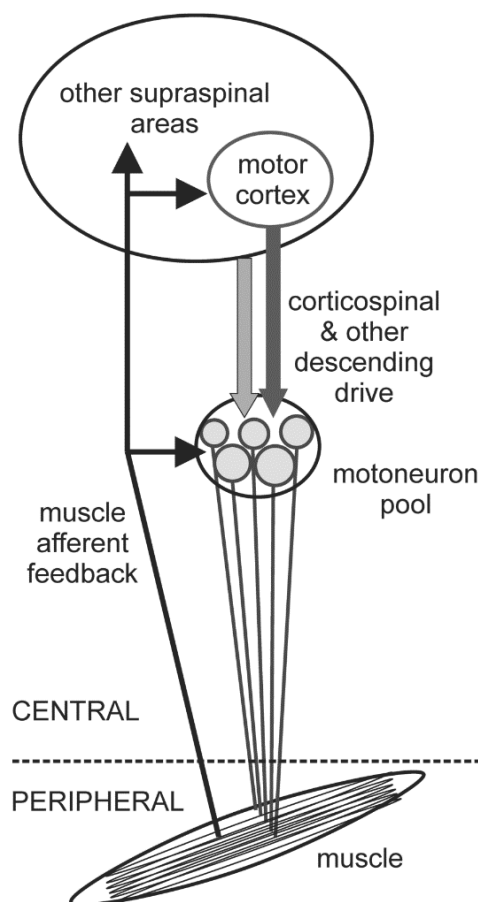


Figure 13. Schéma simplifié de l'interaction entre la fatigue périphérique et la fatigue centrale d'après le modèle du seuil critique de fatigue périphérique.

Les afférences III et IV (« muscle afferent feedback ») limiteraient la contraction musculaire soit en 1) diminuant directement la commande motrice au niveau du cortex moteur (« motor cortex ») ou de la moelle épinière, soit en 2) activant une boucle inhibitrice au niveau d'autres aires cérébrales supra-spinales (« other supraspinal areas ») (Taylor *et coll.*, 2016)

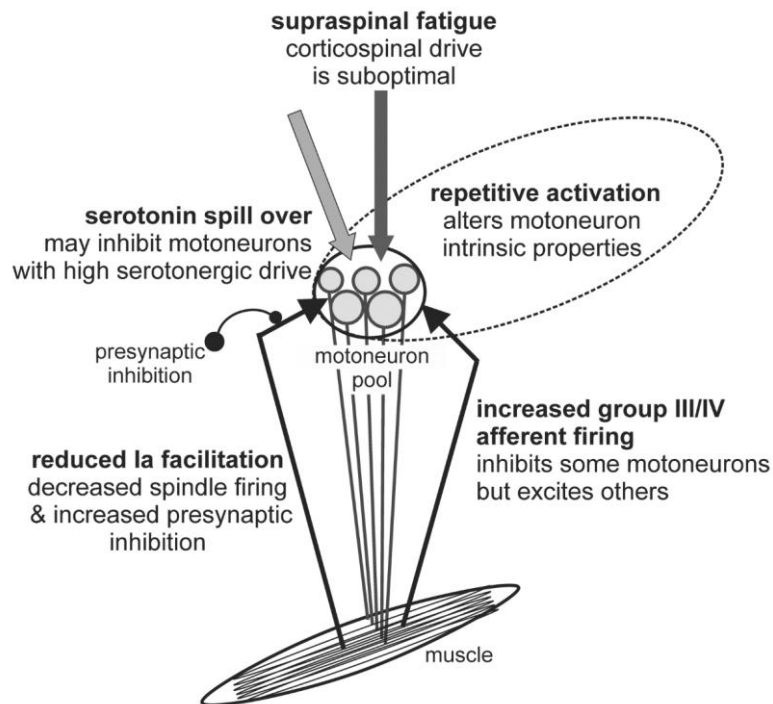


Figure 14. Représentation détaillée des différents mécanismes centraux susceptibles de réduire le niveau d'activation des motoneurones et de provoquer la fatigue centrale.

Tout d'abord, les remontées afférentes de type III et IV (« increased group III/IV afferent firing ») provoqueraient directement une réduction de l'activation des motoneurones. L'activation répétée des motoneurones provoquerait également une diminution de leur excitabilité (« repetitive activation alters motoneuron intrinsic properties »). La fatigue supra-spinal, dont les origines sont encore méconnues, pourraient également diminuer l'excitation corticospinale des unités motrices (« supraspinal fatigue, corticospinal drive is suboptimal »). Les modifications des concentrations cérébrales en neurotransmetteurs et notamment en sérotonine pourraient aussi inhiber l'activation des motoneurones dans le cortex moteur (« serotonin spill over may inhibit motoneurons with high serotonergic drive »). Enfin, d'autres mécanismes, tels qu'une diminution de l'activation des afférences de type Ia avec la fatigue, sont également susceptibles de diminuer les mécanismes neuronaux facilitateurs de la stimulation des motoneurones (« reduced Ia facilitation decreased spindle firing & increased presynaptic inhibition ») (Taylor et coll., 2016).

Ainsi, d'après ce modèle, les progrès suite à l'entraînement pourraient être permis à la fois par des adaptations physiologiques permettant de réduire le développement de la fatigue périphérique, mais également par une élévation de la limite de tolérance sensitive (Hureau et coll., 2018). Cependant, ce second mécanisme n'a été abordé que très partiellement par les défenseurs de ce modèle, et aucune étude n'a encore pu démontrer que ce type d'évolution était réellement observable à la suite de l'entraînement. De la même manière, si ces auteurs, comme ceux du gouverneur central, placent la perception de l'effort au cœur des mécanismes de régulation de l'exercice, ils n'évoquent que de manière très superficielle ce paramètre dans leurs

modèles et n'expliquent en aucune façon son fonctionnement d'un point de vue psychologique. Or, cette perception de l'effort a déjà fait l'objet de nombreuses études bien avant le développement de ces différents modèles (Noble *et coll.*, 1986, Robertson *et coll.*, 1986, Noble et Robertson 1996), et il est largement admis qu'elle peut être évaluée efficacement de manière subjective (sous le nom de « Rating of perceived exertion » ou RPE) à l'aide de l'échelle RPE allant de 6 à 20 ou de l'échelle CR-10 allant de 0 à 10 développées par Borg (Borg 1982, Borg 1985, Borg *et coll.*, 1985, Borg 1998). Il fut même rapporté, comme évoqué précédemment, que la RPE pouvait être influencé à la fois par les réponses physiologiques, mais également par les paramètres psychologiques et l'environnement lié à la tâche (Noble et Robertson 1996). Malgré cela, bon nombre d'études clefs de ces différents modèles psychophysiologiques n'évaluent même pas la RPE lors de leurs expérimentations (St Clair Gibson *et coll.*, 2001, St Clair Gibson et Noakes 2004, Katayama *et coll.*, 2007, Amann 2011, Sidhu *et coll.*, 2017). De la même manière, même si les auteurs à l'origine de ces modèles ont rapidement évoqué le fait que les paramètres psychologiques pouvaient influencer cette perception de l'effort et donc le développement de la fatigue centrale (Amann et Secher 2010a, Hureau *et coll.*, 2018), les mécanismes inhérents à l'influence de ces paramètres psychologiques ne furent aucunement évoqués. En conséquence, bien que ces modèles du gouverneur central et du seuil critique de fatigue périphérique offrent de nombreuses explications sur les mécanismes centraux à l'origine de la performance d'endurance, l'interaction entre les paramètres physiologiques et psychologiques pour l'établissement de la performance nécessite d'être analysée à l'aide de modèles plus poussés.

Parmi les modèles psychophysiologiques expliquant davantage les interactions entre les paramètres physiologiques, la perception de l'effort et les paramètres psychologiques se trouve le principal modèle concurrent de celui d'Amann, à savoir le modèle psychobiologique développée par Marcora et ses collègues (Marcora 2008a, Marcora *et coll.*, 2009, Marcora et Staiano 2010a, Pageaux 2014). Ces auteurs supposent que l'arrêt de l'effort à l'épuisement n'est aucunement lié à des mécanismes inconscients, mais correspondrait au contraire à une décision consciente de l'athlète de se désengager de l'effort en raison d'une perception de l'effort trop élevée (Marcora 2008a, Marcora *et coll.*, 2009, Marcora et Staiano 2010a). En conséquence, il serait nécessaire d'intégrer des concepts psychologiques poussés aux modèles explicatifs de la performance afin de réellement comprendre les mécanismes à l'origine de cette prise de décision et donc de la fatigue (Marcora 2010a, Marcora 2010b). Ce modèle se base ainsi sur la

théorie de la motivation pour l'action (ou « motivation arousal ») de Brehm (Brehm et Self 1989, Wright 1996, 2008), qui suppose que tout individu s'investira dans une tâche tant que l'effort qu'elle impose demeure inférieur à son niveau de motivation potentielle maximal pour la réalisation de cette dernière. Ainsi, dans le cadre d'un effort d'endurance, l'athlète poursuivra l'exercice tant que sa perception de l'effort restera supérieure à ce que son niveau de motivation lui permettra d'endurer. A l'inverse, lorsque cette perception de l'effort deviendra supérieure au niveau de motivation de l'athlète, cela aboutira à la décision consciente de stopper l'effort, correspondant à l'épuisement (Marcora 2008a, Marcora *et coll.*, 2009, Marcora et Staiano 2010a, Pageaux 2014). En conséquence, les deux éléments clefs de ce modèle sont la perception de l'effort et la motivation (**Figure 15**). Tout paramètre, psychologique comme physiologique, en mesure d'influencer cette perception de l'effort ou cette motivation serait donc amené à influencer directement l'effort produit et la performance du sportif (Marcora 2008a, Marcora *et coll.*, 2009, Pageaux 2014, McCormick *et coll.*, 2015). Ce modèle s'appuie notamment sur les études ayant démontré que la fatigue mentale (Marcora *et coll.*, 2009, Pageaux *et coll.*, 2014, Pageaux *et coll.*, 2015c, Smith *et coll.*, 2015, Pageaux et Lepers 2016, Van Cutsem *et coll.*, 2017, Salam *et coll.*, 2018), une pré-fatigue des muscles locomoteurs (Marcora *et coll.*, 2008, De Morree et Marcora 2013, Hopker *et coll.*, 2016, Pageaux et Lepers 2016), l'utilisation de « self-talk » motivationnel (Blanchfield *et coll.*, 2014b, McCormick *et coll.*, 2017) ou encore la visionnage d'images subliminales (Blanchfield *et coll.*, 2014a), influençaient directement l'effort produit et la performance d'endurance en augmentant/diminuant la RPE malgré des paramètres physiologiques de l'effort (fréquence cardiaque, lactatémie ou $\dot{V}O_2$) identiques.

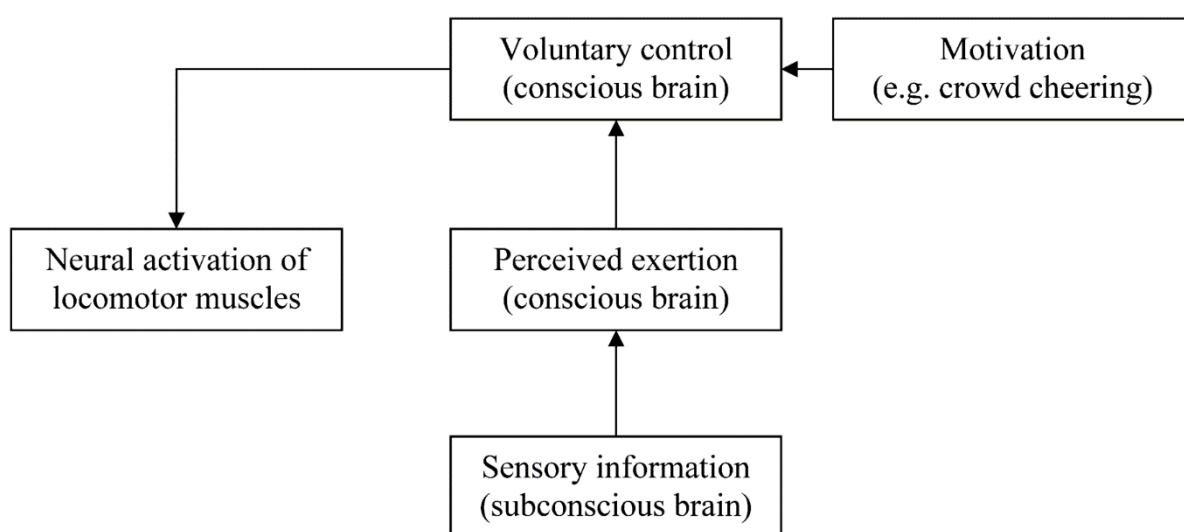


Figure 15. Représentation schématique du modèle psychobiologique.

Les deux éléments clefs de motivation et de perception de l'effort (« Perceived exertion, conscious brain ») vont directement déterminer le contrôle volontaire (« voluntary control, conscious brain ») du niveau d'activation des muscles locomoteurs (« Neural activation of locomotor muscles ») (Marcora 2008a).

Bien que les récentes publications concernant ce modèle aient également incorporé la connaissance de la durée d'effort totale, la connaissance de la durée d'effort déjà effectuée, et l'expérience antérieure de l'athlète afin de pouvoir pleinement expliquer les stratégies anticipatives liées au choix d'une stratégie d'allure (Marcora 2010b, Pageaux 2014), ce modèle se démarque surtout de ceux du gouverneur central ou de la limite critique de fatigue périphérique de par les composantes psychologiques qu'il intègre et qui permettent une compréhension simplifiée de la fatigue et de la tolérance à l'effort de l'athlète. En effet, ce modèle suppose que la régulation de l'effort est uniquement dépendante de la perception de l'effort de l'athlète et donc du cerveau conscient, et qu'en conséquence aucune structure complexe impliquant le cerveau inconscient telle que proposé par le gouverneur central ne serait nécessaire pour expliquer la fatigue et ses mécanismes (Marcora 2008a, 2008b, Shephard *et coll.*, 2009, Marcora 2010a). L'autre différence majeure de ce modèle par rapport à ceux précédemment évoqués réside dans les mécanismes explicatifs proposés comme étant à l'origine de la perception de l'effort. Ces auteurs défendent qu'aucune étude n'est jamais parvenue à démontrer que la perception de l'effort était dépendante de la remontée des afférences III et IV vers le cerveau (Amann *et coll.*, 2008a, Marcora 2008b, 2009, Marcora 2010a, Marcora 2010b, Pageaux 2016, Pageaux et Gaveau 2016, Pageaux et Lepers 2016). A l'inverse, ils expliquent que, si l'activité des afférences III et IV serait bien liée à la sensation de douleur ou aux adaptations cardiovasculaires et respiratoires pendant l'effort, la RPE serait un élément bien distinct de cette douleur perçue et ne dépendrait donc pas des remontées afférentes en provenance des muscles squelettiques (Marcora 2010b, Marcora 2011, Smirmaul 2012, Angius *et coll.*, 2014, Pageaux *et coll.*, 2015a, Pageaux *et coll.*, 2015b, Pageaux et Gaveau 2016). La perception de l'effort serait au contraire définie strictement comme « la sensation consciente de comment l'exercice est difficile, intense et épuisant » (Marcora 2009, Goldstein 2010, Marcora 2011, Pageaux 2016, Pageaux et Gaveau 2016), et serait générée uniquement par la décharge corolaire émise par le cortex moteur lors de l'envoi du signal efférent (**Figure 16**) (Amann *et coll.*, 2008a, Marcora 2008b, 2009, Marcora 2010a, Marcora 2010b, Smirmaul 2012, De Morree *et coll.*, 2014, Bigliassi 2015, Pageaux 2016, Pageaux et Lepers 2016). En conséquence, la fatigue d'après ce modèle serait dans un premier temps systématiquement issue de l'accumulation de métabolites dans le milieu musculaire, à l'origine d'une diminution de la

capacité de production de force des fibres (fatigue périphérique) (Marcora *et coll.*, 2008, Marcora et Staiano 2010b, De Morree et Marcora 2013, Bigliassi 2015, Hopker *et coll.*, 2016, Pageaux et Gaveau 2016, Pageaux et Lepers 2016, Hopker *et coll.*, 2017). En réponse à cette fatigue périphérique, le SNC serait contraint d'augmenter la commande motrice efférente, ce qui provoquerait en parallèle une augmentation de la décharge corolaire émise, et donc une augmentation de la perception de l'effort. L'épuisement surviendrait alors lorsque cette augmentation de la perception de l'effort due à l'augmentation de la commande motrice descendante deviendrait supérieure à ce que la motivation du sportif lui permet d'endurer, provoquant la prise de décision consciente de se désengager de l'effort (Jeukendrup *et coll.*, 2000, Amann *et coll.*, 2008a, Marcora 2008a, Marcora et Staiano 2010a, Marcora et Staiano 2010b, Pageaux 2014, Bigliassi 2015, Pageaux et Gaveau 2016). Ces auteurs s'opposent ainsi à tout concept de fatigue centrale, qui serait due à une diminution inconsciente de la capacité du SNC à stimuler les unités motrices (Marcora 2008b, 2010b). Cette théorie est notamment appuyée par les différentes études ayant démontré que la RPE était directement corrélée au niveau d'activité cérébral (De Morree *et coll.*, 2012), que les sportifs étaient bien capables de dissocier perception de l'effort et la douleur musculaire, induite par électromyostimulation (Pageaux *et coll.*, 2015b) par immersion en bain froid (Angius *et coll.*, 2015a) ou par l'effort (Gros Lambert *et coll.*, 2006, Pageaux *et coll.*, 2015a, Astokorki et Mauger 2017), ou encore que l'inhibition des remontées afférentes III et IV ne permettait pas réellement de diminuer la RPE et d'augmenter le niveau d'effort consenti (Fernandes *et coll.*, 1990, Kjaer *et coll.*, 1999, Smith *et coll.*, 2003, Proske 2005, Marcora 2008b, 2009, Marcora 2010a, Marcora 2010b, Angius *et coll.*, 2013, Barbosa *et coll.*, 2016, Pageaux et Gaveau 2016). De plus, l'augmentation de la perception de l'effort et la diminution de performance associée à la suite d'une pré-fatigue musculaire seraient directement reliées à l'augmentation de la commande motrice efférente pour répondre à cette fatigue périphérique et serait au contraire indépendante du niveau de stress métabolique présent dans le milieu intramusculaire (Marcora *et coll.*, 2008, De Morree et Marcora 2013, Pageaux et Lepers 2016). Enfin, plusieurs études ont également mis en évidence que si la fatigue mentale provoquait une diminution de la performance en endurance, les capacités maximales de production de force n'étaient pas affectées par celle-ci (Pageaux *et coll.*, 2013, Rozand *et coll.*, 2014, Martin *et coll.*, 2015b, Pageaux et Lepers 2016). En conséquence, cette fatigue mentale ne diminuerait pas la performance en raison d'une fatigue centrale inconsciente rendant impossible le recrutement maximal des fibres musculaires, mais davantage en raison d'une augmentation directe de la RPE, empêchant l'athlète d'exploiter au maximum

ses réserves physiologiques anaérobies lors de l'effort (Pageaux *et coll.*, 2013, Salam *et coll.*, 2018).

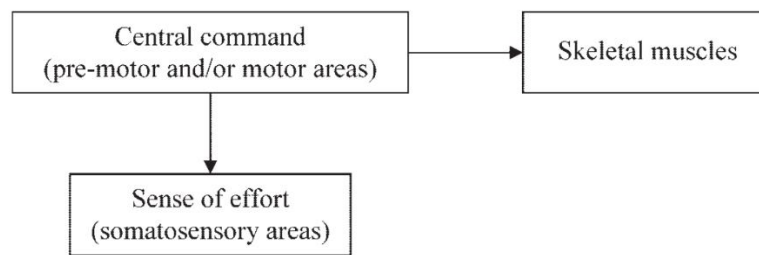


Figure 16. Représentation simplifiée de la génération de la perception de l'effort d'après le modèle psychobiologique.

La commande centrale (« Central command ») serait à la fois à l'origine de l'activation des fibres musculaires (« Skeletal muscles ») et de la perception de l'effort via la décharge corolaire (« Sense of effort ») (Marcora 2009).

Ce modèle psychobiologique permet ainsi une compréhension facilitée de la performance d'endurance et de ses limites, en remettant au cœur des mécanismes à l'origine de la fatigue la RPE et les paramètres psychologiques susceptibles de l'influencer. En conséquence, la fatigue serait un mécanisme principalement initié dans le cerveau de l'athlète (Pageaux et Lepers 2016), et l'amélioration des performances et les progrès suite à l'entraînement seraient avant tout possibles en raison d'adaptation mentales, comme le montre la résistance supérieure observée chez des cyclistes de niveau élite à la fatigue mentale et à son influence néfaste sur la performance et la RPE (Martin *et coll.*, 2015a, Martin *et coll.*, 2016). Ces auteurs proposent d'ailleurs que l'utilisation de techniques d'entraînement spécifiques utilisant la fatigue mentale comme stimulus d'entraînement en plus d'un exercice physique (« Brain Endurance Training ») permettrait d'améliorer les performances (Marcora *et coll.*, 2015).

Ce modèle offre également une explication simplifiée des mécanismes neuronaux à l'origine de la perception et de la régulation de l'effort. En effet, comme expliqué précédemment, la régulation de l'effort d'après ce modèle serait uniquement issue de l'émission de la décharge corolaire par les cortex moteur et prémoteur lors de l'émission de la commande motrice efférente, à l'origine de la perception de l'effort (Amann *et coll.*, 2008a, Marcora 2008b, 2009, Marcora 2010a, Marcora 2010b, Smirmaul 2012, De Morree *et coll.*, 2014, Bigliassi 2015, Pageaux 2016, Pageaux et Lepers 2016). Dès lors, les boucles inhibitrices et facilitatrices complexes reliant commande motrice, remontées afférentes et perceptions de l'effort, nécessaires d'après les hypothèses des modèles du gouverneur central et de la limite critique de

fatigue périphérique, n'auraient plus lieu d'être. Les défenseurs du modèle psychobiologiques expliquent même que la perception et donc la régulation de l'effort serait uniquement dépendante de mécanismes centraux, siégeant exclusivement dans le cerveau (Nachev *et coll.*, 2008, Smirmaul 2012, De Morree *et coll.*, 2014). Cette perception de l'effort serait issue uniquement de la décharge corolaire émise par les aire motrice et prémotrice lors de l'émission de la commande nerveuse efférente (De Morree *et coll.*, 2014). La décharge corolaire influencerait ensuite les différentes aires du cerveau, dont le cortex cingulaire antérieur, l'aire prémotrice supplémentaire et l'aire motrice supplémentaire, qui seraient notamment à l'origine de la perception de l'effort et de la prise de décision (Walton *et coll.*, 2006, Amann *et coll.*, 2008a, Nachev *et coll.*, 2008, Marcora *et coll.*, 2009, Pageaux *et coll.*, 2013, Pageaux 2014, Pageaux *et coll.*, 2014). Ce mécanisme de décharge corolaire expliquerait notamment pourquoi la stimulation transcrânienne (« transcranial direct current stimulation » ou tDCS) permettrait de diminuer la RPE et d'améliorer les performances d'endurance (De Morree *et coll.*, 2014, Angius *et coll.*, 2015b, Okano *et coll.*, 2015, Angius *et coll.*, 2016, Angius *et coll.*, 2018). La tDCS permettrait d'augmenter l'excitabilité du cortex moteur, permettant ainsi de diminuer la décharge corolaire, et donc la perception de l'effort pour un même niveau d'intensité d'exercice.

Cependant, malgré tous les résultats précédemment évoqués, aucune étude n'est à ce jour encore parvenue à démontrer que la perception de l'effort était principalement due à la décharge corolaire, tel que défendu par le modèle psychobiologique. De plus, ce modèle défend également que la fatigue centrale serait un concept erroné, or de nombreuses études ont mis en évidence qu'il existait bel et bien une diminution inconsciente de la commande maximale volontaire à épuisement (Bigland-Ritchie *et coll.*, 1978, Garland et Kaufman 1995, Gandevia *et coll.*, 1996, Gandevia 2001, Kay *et coll.*, 2001, Amann 2011, Decorte *et coll.*, 2012, Millet *et coll.*, 2012, Amann *et coll.*, 2013, Froyd *et coll.*, 2013, Temesi *et coll.*, 2013, Hureau *et coll.*, 2014, Froyd *et coll.*, 2016a, 2016b, Hureau *et coll.*, 2016, Thomas *et coll.*, 2016, Jubeau *et coll.*, 2017, Temesi *et coll.*, 2017, Aboodarda *et coll.*, 2018, Mira *et coll.*, 2018). D'autres auteurs ont ainsi proposé que les mécanismes à l'origine de la fatigue lors d'un exercice d'endurance seraient avant tout dépendants des caractéristiques de l'effort réalisé (Perrey *et coll.*, 2010). Pour les efforts de courte durée (jusqu'à 5 minutes), la fatigue périphérique serait importante alors que la fatigue centrale serait réduite voire inexistante (Froyd *et coll.*, 2013, Froyd *et coll.*, 2016a). A l'inverse, pour les efforts de longue durée (supérieure à 10 minutes) ou répétés, la

fatigue périphérique augmenterait principalement dans la première moitié de l'effort, avant de stagner ensuite (Decorte *et coll.*, 2012, Froyd *et coll.*, 2016a). En revanche, la fatigue centrale serait bien plus importante lors de ce type d'effort, et expliquerait majoritairement l'apparition de l'épuisement (Decorte *et coll.*, 2012, Froyd *et coll.*, 2016a). Ces résultats mettent également en évidence qu'il n'existerait pas un seuil unique de fatigue périphérique qui provoquerait l'apparition de la fatigue centrale et l'épuisement, étant donné que la fatigue centrale serait notamment plus importante pour les efforts de longue durée malgré un niveau de fatigue périphérique réduit (Froyd *et coll.*, 2016a). De plus, il a également été montré que pour deux efforts à intensité maximale volontaire identiques, le niveau de fatigue périphérique atteint pouvait être différent (Froyd *et coll.*, 2016b). Ainsi, la fatigue périphérique et la fatigue centrale seraient deux éléments bien distincts, dont le développement serait dépendant de la durée et de l'intensité de l'effort réalisé (Froyd *et coll.*, 2016a).

Millet a notamment proposé le modèle de la chasse d'eau (« Flush model ») afin de mieux comprendre l'interaction entre ces mécanismes de fatigue centrale et périphérique (Millet 2011). D'après ce modèle, l'accumulation de fatigue périphérique pendant l'effort peut être assimilée à l'accumulation d'eau au sein du réservoir d'une chasse d'eau (**Figure 17**). Ce niveau de fatigue périphérique serait détecté par l'organisme, comme le flotteur d'une chasse d'eau permet de quantifier le niveau d'eau dans le réservoir, et déterminerait la RPE (1, **Figure 17**). La RPE augmenterait ainsi selon l'effort fourni (vitesse de remplissage du réservoir ; 2, **Figure 17**) et diminuerait avec le repos (évacuation de l'eau par le conduit d'évacuation ; 3, **Figure 17**). La fatigue centrale serait représentée par la réserve conservée même à épuisement (4, **Figure 17**), qui servirait de sécurité afin d'éviter le débordement d'eau au-delà du réservoir, ou dans le cas de l'organisme afin d'éviter tout dommage physiologique majeur susceptible de mettre en péril la survie de l'organisme. Ainsi, la fatigue périphérique (quantité totale d'eau dans le réservoir) et la fatigue centrale (réserve de sécurité conservée au déclenchement de la chasse d'eau pour l'évacuation par le conduit d'évacuation) interagiraient afin de déterminer les conséquences psychophysiologiques de l'effort et l'épuisement.

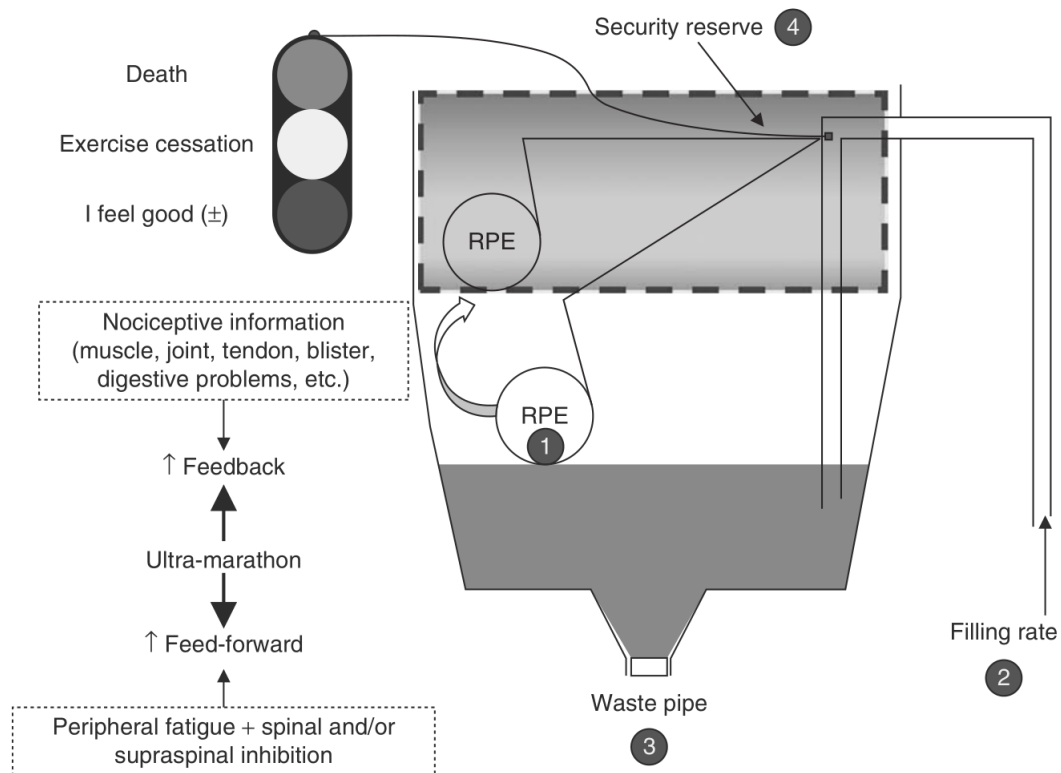


Figure 17. Modèle de la chasse d'eau (Millet 2011).

La fatigue périphérique pourrait être assimilée à l'accumulation d'eau dans le réservoir, et serait détectée par le flotteur afin de générer la perception de l'effort (1). Ce niveau d'eau augmenterait selon l'intensité de l'effort (2, « Filling rate ») et serait évacué au repos par le conduit d'évacuation (3, « Waste pipe »). Lorsque le niveau d'eau atteint un niveau équivalent à la réserve de sécurité pour la survie de l'organisme (4, « Security reserve »), la fatigue centrale provoquerait l'épuisement, afin d'assurer l'évacuation de l'eau par le conduit.

Ce modèle permet également de comprendre que ce n'est pas le niveau de fatigue périphérique en lui-même qui déterminerait l'épuisement, mais la perception de l'effort, issue de l'interprétation par l'organisme de la quantité de fatigue périphérique accumulée (Millet *et coll.*, 2018). Ainsi, l'ensemble des paramètres centraux et psychologiques susceptibles d'influencer la perception de l'effort influenceraient directement le développement de la fatigue centrale et la performance réalisée. La privation de sommeil (Temesi *et coll.*, 2013) ou le manque d'oxygénation du cerveau en hypoxie (Millet *et coll.*, 2012, Jubeau *et coll.*, 2017) augmenteraient notamment la RPE et donc la fatigue centrale à épuisement. A l'inverse, la consommation de psychotropes ou l'augmentation du plaisir ressenti permettraient de diminuer la RPE pour un même niveau de fatigue périphérique et de puiser ainsi de manière plus importante dans la réserve de sécurité (Millet 2011). La taille de la réserve de sécurité conservée à épuisement serait également dépendante du niveau de motivation de l'athlète (Millet 2011,

Millet *et coll.*, 2018). Bien que ce modèle ait été dans un premier temps développé pour l'étude d'épreuves d'ultra-endurance telles que les ultra-marathons en course à pied, il semble également transposable dans l'ensemble des disciplines d'endurance telles que le cyclisme afin de mieux comprendre les différents mécanismes à l'origine de la fatigue. En revanche, les adaptations psychophysiologiques permettant d'expliquer les progrès à la suite de l'entraînement d'après ce modèle restent encore méconnues. En effet, les résultats de différentes études ont déjà permis de mettre en évidence que l'entraînement permettrait de réduire la fatigue centrale à la suite d'un effort d'endurance (Zghal *et coll.*, 2015, O'leary *et coll.*, 2017). Ainsi, d'après le modèle de la chasse d'eau, l'entraînement pourrait donc être associé à une meilleure tolérance de la fatigue périphérique, permettant de davantage puiser dans la réserve de sécurité (Millet 2011). Cependant, cette hypothèse reste encore en débat. En effet, Temesi *et coll.* ont montré que le développement des capacités cardiovasculaires permettrait surtout de diminuer le niveau de fatigue périphérique (Temesi *et coll.*, 2017). Certaines études ont même montré qu'après l'entraînement, le niveau de fatigue périphérique à l'épuisement serait plus faible, illustrant que les adaptations liées à l'entraînement permettraient uniquement de réduire le niveau de fatigue périphérique pour un même effort et n'influenceraient pas le développement de la fatigue centrale (Aboodarda *et coll.*, 2018, Mira *et coll.*, 2018).

Ainsi, malgré les nombreux modèles psychophysiologiques de la performance développés depuis le début des années 2000, il est impossible de conclure avec certitude concernant les mécanismes cérébraux à l'origine de la fatigue, des progrès suite à l'entraînement, et donc de la performance d'endurance. En revanche, ces différents modèles ont tous l'avantage de remettre le siège des mécanismes de régulation de l'effort principalement au sein du cerveau. En conséquence, tous les paramètres psychologiques, tels que le focus attentionnel, les émotions ou de manière générale l'ensemble des processus cognitifs, susceptibles d'influencer les mécanismes neuronaux pourraient influencer la perception de l'effort et la performance (De Morree *et coll.*, 2014). La performance d'endurance, et donc cycliste, de haut-niveau ne peut être appréhendée de manière fiable et précise qu'en prenant en compte à la fois les paramètres physiologiques mais également les paramètres psychologiques susceptibles d'influencer la perception de l'effort.

4. Les modèles de la performance permettant d'expliquer les interactions entre paramètres psychologiques, perception de l'effort et contrôle de l'intensité lors d'un exercice d'endurance

Les différents modèles psychophysiologiques ont ainsi expliqué que tous les paramètres psychologiques susceptibles d'influencer la perception de l'effort influenceraient directement la performance d'endurance. Cependant, aucun de ces modèles n'a jamais précisé les processus psychologiques à l'origine de ces altérations de la perception de l'effort. En conséquence, si on souhaite réellement aboutir à une prédiction fiable de la performance cycliste de haut-niveau, d'autres modèles, proposant une véritable théorie psychologique de la régulation de l'effort lors d'une performance d'endurance, doivent également être mobilisés.

Le premier modèle proposant une explication plus complète concernant l'influence des paramètres psychologiques sur les mécanismes de régulation de l'effort fut le modèle proposé par Baron *et coll.* (2011). Ce modèle suppose que les émotions détermineraient directement le niveau d'effort consenti par l'athlète. En effet, si ces auteurs reprennent principalement les hypothèses du modèle du gouverneur central et la boucle afférente-efférente pour expliquer la génération de la perception de l'effort, ils expliquent également, en accord avec le modèle psychobiologique, que les aires du cerveau concernées par cette perception de l'effort seraient étroitement liées aux aires cérébrales à l'origine des émotions. Ils précisent même que, tout comme la perception de l'effort, les émotions seraient issues de l'intégration des signaux physiologiques en provenance de l'ensemble de l'organisme dans le but d'amener l'individu à adopter un comportement optimal par rapport à l'état physiologique actuel de l'organisme (Damasio *et coll.*, 2000, Pollatos *et coll.*, 2005, Gray *et coll.*, 2007). La perception de l'effort et les émotions seraient donc deux concepts étroitement liés, issus de processus cérébraux analogues. En conséquence, ces auteurs expliquent que ce n'est pas simplement la perception de l'effort mais davantage sa valeur affective telle que ressentie par le sujet qui déterminerait son comportement et l'intensité d'effort consentie (Baron *et coll.*, 2011). Cette perception de l'effort générerait notamment un ressenti affectif négatif, qui inciterait l'athlète à consciemment se désengager de la tâche. De plus, ce modèle explique également que si ce ressenti affectif négatif déterminait directement l'intensité d'effort consentie, les émotions positives pourraient également contrebalancer ces émotions négatives liées à la perception de l'effort et influencer ainsi la performance. La gestion de l'effort de l'athlète serait donc dépendante de ce que ces

auteurs ont défini sous le nom de charge affective, qui correspond à la différence entre le ressenti affectif négatif, notamment lié à la perception de l'effort, et le ressenti affectif positif pendant l'exercice (Baron *et coll.*, 2011, Baron *et coll.*, 2015). Plus la charge affective serait faible, en raison d'une intensité et donc d'une perception de l'effort réduite ou d'un ressenti affectif positif important, et plus l'athlète serait incité à augmenter l'intensité de son effort dans le but d'atteindre son objectif. A l'inverse, plus cette charge affective serait élevée, en raison d'une perception de l'effort importante ou d'un ressenti émotionnel positif faible, et plus l'athlète serait incité à réduire son effort et à se désengager de la tâche. L'épuisement et l'arrêt complet de l'effort serait ainsi dû à une charge affective supérieure à ce que la motivation de l'athlète lui permet d'endurer. Le cerveau régulerait donc l'intensité d'exercice tout au long de l'effort de manière anticipative, afin d'éviter toute défaillance émotionnelle majeure avant la fin de l'exercice, permettant ainsi de préserver l'homéostasie de l'organisme à travers le ressenti affectif (**Figure 18**).

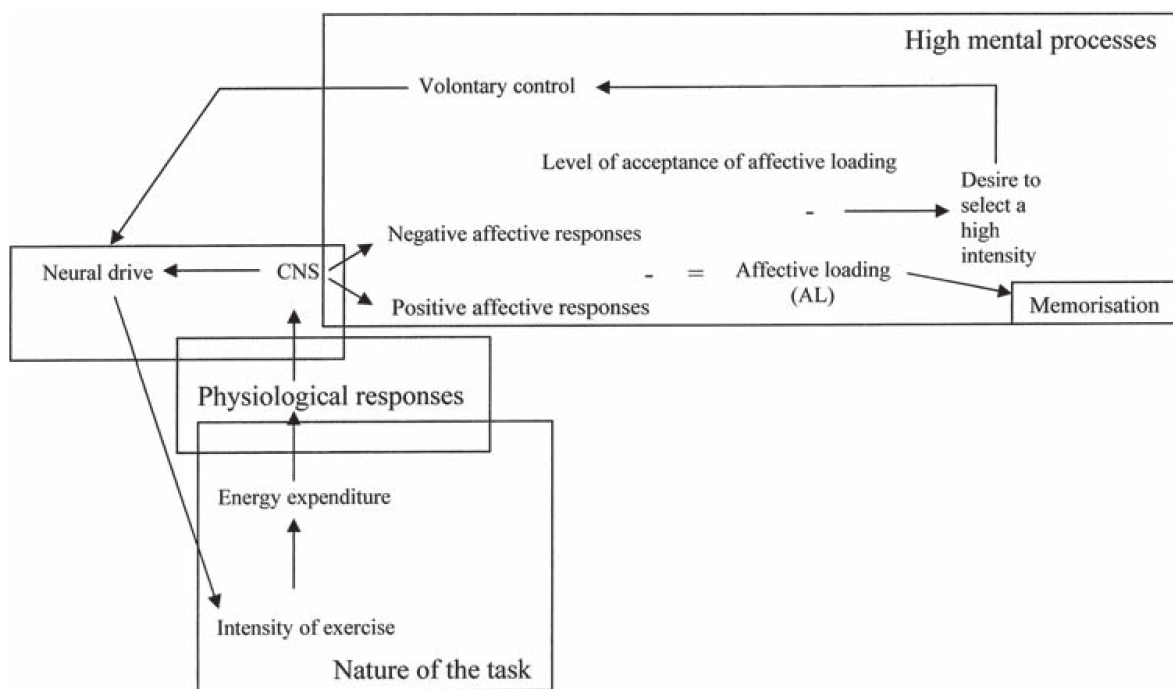


Figure 18. Représentation détaillée du modèle de la charge affective (Baron *et coll.*, 2011).

L'ensemble des réponses physiologiques de l'organisme (« Physiological responses ») seraient intégrées par le système nerveux central (« CNS ») afin de générer les réponses affectives positives (« Positive affective responses ») et négatives (« Negative affective responses »). La différence entre ces niveaux affectifs positifs et négatifs serait à l'origine de la charge affective (« Affective loading (AL) ») qui déterminerait directement le désir de l'athlète de maintenir une intensité d'effort élevée (« Desire to select a high intensity »).

Plusieurs études semblent confirmer ces hypothèses et l'intérêt de prendre en compte les émotions pour l'étude de la performance et des mécanismes de régulation de l'effort. Baron *et coll.* ont démontré que la perte de vitesse lors d'effort maximaux répétés était directement corrélée à l'augmentation de la charge affective, correspondant également à une diminution du désir de poursuivre l'effort (Baron *et coll.*, 2015). De la même manière, Renfree *et coll.* ont également démontré que le choix d'une stratégie de gestion de l'effort était directement relié à l'état émotionnel du cycliste (Renfree *et coll.*, 2012). Ils ont notamment mis en évidence que les cyclistes choisissant une stratégie de gestion de l'effort plus agressive, avec un départ plus rapide, et aboutissant à une meilleure performance se distinguaient par un niveau de ressenti affectif positif significativement plus élevé, et un niveau de ressenti négatif significativement plus faible que les cyclistes adoptant une stratégie d'allure plus prudente, avec un départ à une intensité d'effort plus faible. Ces cyclistes seraient notamment capables de développer des $P_{méca}$ moyenne plus élevées et de supporter des lactatémies plus importantes en dépit d'une RPE statistiquement non-différent par rapport aux athlètes avec un ressenti affectif négatif plus important (**Figure 19**). Ces résultats mettent ainsi en évidence l'importance de prendre en compte et d'évaluer les paramètres émotionnels et la charge affective pour l'étude de la performance cycliste. Baron *et coll.* expliquent notamment que ces paramètres émotionnels seraient essentiels à prendre en compte dans l'entraînement des athlètes de haut-niveau, dans le but d'optimiser au maximum leurs performances (Baron *et coll.*, 2011). Non seulement un niveau de ressenti affectif supérieur à l'entraînement permettrait à l'athlète de supporter une intensité d'effort supérieure, dans le but d'augmenter les adaptations physiologiques, mais il serait également important pour les entraîneurs de veiller à entretenir ces émotions positives à l'approche des compétitions, afin de diminuer au maximum la charge affective de leurs athlètes, et de leur permettre ainsi de tolérer des intensités d'exercice plus élevées en compétition (Baron *et coll.*, 2011).

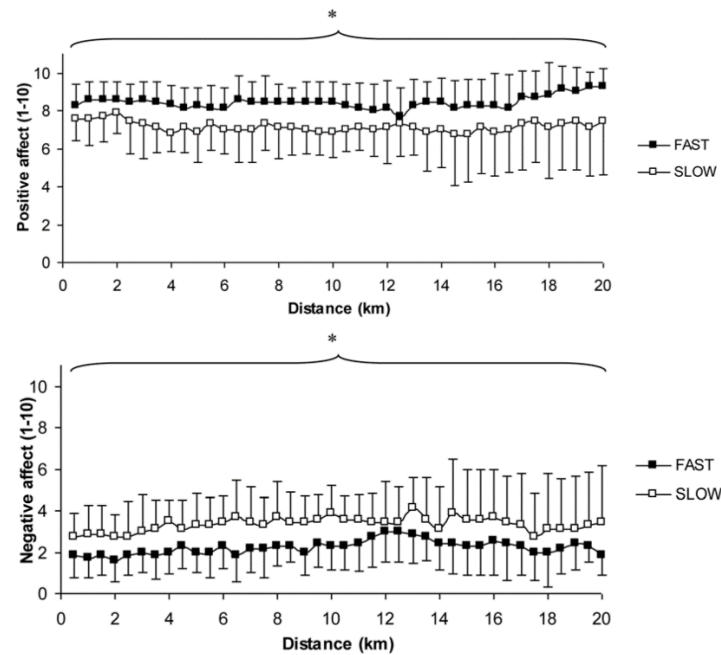


Figure 19. Evolution des ressentis affectifs positif (« Positive affect ») et négatif (« Negative affect ») au cours d'un contre-la-montre de 20 km chez des cyclistes effectuant un départ rapide et réalisant une meilleure performance (« FAST ») par rapport à des cyclistes adoptant une stratégie d'allure plus prudente (« SLOW ») (Renfree et coll., 2012).

Les cyclistes du groupe FAST présentent des niveaux affectifs positifs significativement plus élevés et des niveaux affectifs négatifs significativement plus faibles que les cyclistes du groupe SLOW.

Un autre paramètre psychologique essentiel à prendre en compte pour comprendre les mécanismes de régulation de l'effort et prédire la performance d'endurance serait le focus attentionnel. Le focus attentionnel correspond au processus cognitif par lequel l'athlète va focaliser son attention et ses pensées sur un élément particulier pendant son effort (Brick et coll., 2014, Bertollo et coll., 2015). Les premiers auteurs s'étant intéressé à ce focus attentionnel pendant l'effort mirent rapidement en évidence que deux types de stratégies pouvaient exister : l'association, qui correspond à la stratégie utilisée lorsque l'athlète focalise son attention sur ses sensations corporelles pendant l'effort, et la dissociation, qui correspond à la stratégie utilisée lorsque l'athlète focalise son attention sur d'autres éléments que ses sensations corporelles et essaie ainsi de se distraire de l'effort qu'il est en train de réaliser (Morgan et Pollock 1977). Ces auteurs ont également rapidement évoqué que la dissociation étant liée à une distraction des signaux corporels essentiels pour réguler l'effort, ce type de stratégie serait lié à une moins bonne gestion de l'effort, entraînant un plus grand risque de blessure, de crampes, de déshydratation ou encore d'hyperthermie (Morgan 1978). A l'inverse, l'association, en permettant davantage de prendre en compte les différents signaux d'alerte avant la survenue de

ces différents problèmes, serait liée à une meilleure gestion de l'effort, permettant d'adopter des stratégies de prévention (ravitaillement, hydratation, ajustement de la vitesse...). Cependant, plusieurs études sont venues contredire ces hypothèses, démontrant notamment que les blessures, ou encore les sensations négatives liées au « mur du marathon », n'étaient pas uniquement reliées à des pensées dissociatives, mais pouvaient également survenir en cas de stratégies de pensées associatives (Summers *et coll.*, 1982, Okwumabua 1985, Masters et Lambert 1989). Tenenbaum fut ensuite le premier à définir un véritable modèle expliquant les relations entre le focus attentionnel et les mécanismes de régulation de l'effort (Tenenbaum 2001, 2005). Cet auteur expliqua notamment que le focus attentionnel serait directement relié à l'intensité de l'effort produit. A intensité faible, l'athlète serait capable de « switcher » entre association et dissociation pendant l'effort. A l'inverse, lorsque l'intensité d'effort augmente, l'athlète aurait de plus en plus de mal à contrôler ses pensées et serait de plus en plus focalisé exclusivement de manière associative en raison de l'augmentation de la RPE (Hutchinson et Tenenbaum 2007, Stanley *et coll.*, 2007, Connolly et Tenenbaum 2010). En conséquence, cette théorie permettrait de supposer que diminuer l'association et augmenter la dissociation à intensité élevée pourrait permettre de diminuer la RPE (Masters et Ogles 1998, Stanley *et coll.*, 2007). Cependant, les études s'étant intéressées à la relation entre focus attentionnel et RPE ont obtenu des résultats contradictoires. Si certaines études ont en effet réussi à mettre en évidence une augmentation de la RPE avec l'augmentation de l'association (Johnson et Siegel 1992, Connolly et Janelle 2003, Baden *et coll.*, 2005, Stanley *et coll.*, 2007), d'autres ont au contraire démontré que la dissociation était à l'origine d'une augmentation de la RPE (Brewer *et coll.*, 1996, Beaudoin *et coll.*, 1998, Couture *et coll.*, 1999). Certaines études tendent même à montrer que le focus attentionnel n'aurait pas d'influence sur l'effort réalisé et la performance (Weinberg *et coll.*, 1984, Harte et Eifert 1995). De la même manière, la définition des catégories association et dissociation a pendant longtemps variée selon les auteurs, provoquant des problèmes dans l'interprétation des résultats et la classification des pensées (Stevinson et Biddle 1998, Brick *et coll.*, 2014). En effet, si l'association ne concernait à l'origine que les pensées liées au ressenti physique pendant l'effort (Morgan et Pollock 1977, Morgan 1978), d'autres auteurs ont ensuite évoqué le fait que l'association pouvait également se référer à toute pensée liée à un élément pertinent pour la tâche, y compris pour des éléments extérieurs à l'individu (vitesse, comportement des adversaires, distance restante...) (Sacks *et coll.*, 1981, Masters et Lambert 1989). Il serait également possible de différencier deux catégories de dissociation, selon l'origine du stimulus à l'origine de ces pensées : les distractions générées par l'athlète lui-même (par exemple imaginer de la musique ou réfléchir à des éléments non liés à la tâche), et

les distractions liées à un stimulus externe (par exemple le public ou le paysage) (Padgett et Hill 1989, Goode et Roth 1993).

Les premiers auteurs à proposer une classification réellement complète des différentes catégories de focus attentionnel furent Stevinson et Biddle (1998). Ces auteurs définirent quatre types de focus attentionnel, liés à la fois à sa pertinence vis-à-vis de la tâche ainsi qu'à son origine par rapport à l'action de l'individu : 1) le suivi de la performance à partir des sensations corporelles internes (appelé « Inward monitoring »), 2) le suivi de la performance à partir d'indices extérieurs à l'individu (appelé « Outward monitoring » ; par exemple les pensées liées à la vitesse ou à la durée restante à parcourir), 3) l'utilisation de distraction initiée par l'athlète lui-même (appelée « Inward distraction » ; par exemple imaginer de la musique ou réfléchir à des éléments non liés à la performance), et 4) les distractions issues de stimuli externes à l'individus (appelées « Outward distraction » ; par exemple les pensées liées au public ou à l'environnement). Cette nouvelle classification permet notamment d'obtenir des résultats bien plus explicites concernant l'impact du focus attentionnel sur l'effort et la performance d'endurance. En effet, ces auteurs ont montré que le ressenti du « mur du marathon » et ses conséquences néfastes sur la perception de l'effort étaient liés à un niveau significativement plus élevé d'Inward distraction. Ce type de focus attentionnel représenterait une stratégie particulièrement hasardeuse, car l'athlète ne prendrait alors aucune information afin de bien réguler son effort, ce qui augmenterait grandement le risque d'erreur de gestion, de blessure et de contreperformance. A l'inverse, les Outward distractions n'auraient pas cet effet néfaste sur la performance, car elles permettraient non seulement de recueillir de manière inconsciente des indices sur les éléments clefs de la performance (tels que la vitesse actuelle ou la distance restante à parcourir), mais permettraient surtout à l'athlète d'augmenter son ressenti positif grâce à l'environnement, et notamment à la présence du public, afin de moins subir les effets négatifs de la perception de l'effort. Enfin, les pensées liées à l'Inward monitoring seraient importantes afin de réguler au mieux l'effort. Cependant, des relations significatives ont également été identifiées entre ce niveau d'Inward monitoring et la durée et la survenue de manière anticipée du « mur du marathon ». Si utilisé en excès, ce type de pensées risquerait donc de provoquer une augmentation des effets négatifs liés à la fatigue et à la perception de l'effort. Ainsi, l'utilisation de l'Outward monitoring serait le focus attentionnel le plus efficace pour la performance, permettant à la fois à l'athlète de recueillir les informations essentielles lui permettant de réguler son effort, tout en maintenant ses pensées éloignées de la perception de l'effort et de ses retombées négatives.

Brick *et coll.* ont ensuite repris ces catégories de focus attentionnel définies par Stevinson et Biddle et ont notamment proposé d'ajouter une cinquième catégorie afin de mieux différencier les différents types de pensées liées à l'Inward monitoring (Brick *et coll.*, 2014). D'après ces auteurs, ces pensées internes liées à l'effort peuvent à la fois correspondre à des pensées liées aux sensations corporelles (par exemple à la respiration, à la perception de l'effort, aux douleurs musculaires...) ou à des pensées liées au contrôle de l'action pendant la tâche (par exemple des pensées liées à la technique, à la gestion de l'effort, à de la relaxation...) (Cameron et Leventhal 2003). En conséquence, les pensées du sportif peuvent être divisées en cinq catégories : 1) les pensées liées aux sensations corporelles pendant l'effort (« Internal sensory monitoring »), 2) les pensées liées au contrôle de l'action ou des émotions (« Active self-regulation »), 3) les pensées liées à des éléments externes pertinents pour la performance (« Outward monitoring »), 4) les distractions générées activement par l'athlète (« Active distraction »), et 5) les distractions liées à un stimulus externe (« Involuntary distraction » ; **Tableau 1**) (Brick *et coll.*, 2014). Cette nouvelle classification permettrait ainsi de définir avec encore davantage de précision l'influence des pensées internes sur la performance d'endurance. Si les pensées liées à l'Active self-regulation seraient favorables pour optimiser la gestion de l'effort, l'économie ou la gestion émotionnelle de l'athlète (Spink et Longhurst 1986, Rushall et Shewchuk 1989, Clingman et Hilliard 1990, Crews 1992), les pensées liées à l'Internal sensory monitoring risqueraient d'exacerber le ressenti négatif lié à la perception de l'effort et donc de diminuer l'intensité d'effort consentie par l'athlète (Pennebaker et Lightner 1980, Stanley *et coll.*, 2007). Brick *et coll.* remettent également les caractéristiques de la tâche au cœur de la relation entre focus attentionnel et performance (Brick *et coll.*, 2014). Selon les caractéristiques de l'épreuve et de l'effort réalisé, et notamment sa durée, les qualités mentales sollicitées seront différentes. En effet, si les épreuves d'endurance de courte durée, telles que principalement utilisées dans les différentes études sur la performance d'endurance, sollicitent surtout les qualités de motivation et de tolérance à l'effort et à la douleur, les épreuves de plus longues durées, dépassant plusieurs heures, implique également une part importante de résistance à l'ennui (Taylor 1995). En conséquence, les études futures s'intéressant à la performance d'endurance doivent essayer de retranscrire au mieux les conditions existantes lors de compétitions réelles, afin de prendre en compte et de respecter l'importance du focus attentionnel pour l'établissement de la performance. De la même manière, les caractéristiques des athlètes peuvent également influencer la relation entre le type de focus attentionnel utilisé et la performance. Le type de focus attentionnel préféré de l'athlète (Rejeski et Kenney 1987, Couture *et coll.*, 2003, Baghurst *et coll.*, 2004, Forys et Dahlquist 2007), ainsi que son niveau

d'expérience (Wrisberg et Pein 1990, McDonald et Kirkby 1995, Brick *et coll.*, 2014) pourrait notamment influencer cette relation. Il serait donc intéressant pour les études futures d'identifier les stratégies de gestion des pensées les plus utilisées par les athlètes élités, afin de déterminer quel type de focus attentionnel peut réellement permettre d'améliorer les performances au plus haut niveau (Brick *et coll.*, 2014).

Tableau 1. Définition des différentes catégories de focus attentionnel (adapté de Brick *et coll.*, 2014).

Catégories de pensées			Exemples de pensées
d'après Morgan et Pollock (1977)	d'après Stevinson et Biddle (1998)	d'après Brick <i>et coll.</i> (2014)	
Association	Suivi de la performance à partir d'indices internes (<i>Inward monitoring</i>)	Suivi de la performance à partir des sensations corporelles (<i>Internal sensory monitoring</i>)	Pensées liées à la perception de l'effort ou à la douleur musculaire...
		Pensées liées au contrôle de l'action et des émotions (<i>Active self-regulation</i>)	Pensées liées à la technique de pédalage ou à la gestion de l'effort...
	Suivi de la performance à partir d'indices externes (<i>Outward monitoring</i>)	Suivi de la performance à partir d'indices externes (<i>Outward monitoring</i>)	Pensées liées au parcours ou aux adversaires...
Dissociation	Distractions internes (<i>Inward Distraction</i>)	Distractions actives (<i>Active Distraction</i>)	Imaginer de la musique ou s'efforcer de penser à autre chose...
	Distractions externes (<i>Outward Distraction</i>)	Distractions involontaires (<i>Involuntary distraction</i>)	Pensées liées au public ou à l'environnement...

Ces auteurs ont ensuite proposé d'étendre leur modèle sur l'impact du focus attentionnel sur la performance d'endurance en y ajoutant le concept de métacognition (Brick *et coll.*, 2015, Brick *et coll.*, 2016b). Ce concept de métacognition correspond aux stratégies cognitives mises en place pour le contrôle et l'ajustement des pensées (Flavell 1979, Efklides 2006). En conséquence, l'utilisation du concept de métacognition permet d'analyser les deux niveaux de processus cognitifs impliqués dans la gestion des pensées pendant l'effort (Brick *et coll.*, 2015, Brick *et coll.*, 2016b). Le premier niveau concerne le choix d'un type de pensée favorable pour

la tâche réalisée (cognition liée à l'objet). Le second niveau concerne les processus cognitifs mis en place pour permettre ce contrôle de la cognition lié à l'objet (Nelson 1996, Efklides 2006). Ce concept est particulièrement intéressant pour l'étude de la performance d'endurance de haut-niveau, car de nombreux travaux semblent indiquer que les athlètes de niveau élite utilisent ce type de stratégie cognitive dans le but de contrôler leurs pensées pendant l'effort (Rushall et Shewchuk 1989, Clingman et Hilliard 1990, Brick *et coll.*, 2015, Brick *et coll.*, 2016b). Cependant, la nature et le but de ces stratégies restent pour le moment méconnus (Brick *et coll.*, 2015). Les études de Brick *et coll.* montrent malgré tout que les expériences métacognitives réactives, telles que ressentir l'intensité d'effort ou évaluer l'attitude des adversaires, mais également les compétences métacognitives, telles que diviser le déroulement de l'épreuve en plusieurs sections ou choisir un type de pensées prédéfini adapté au déroulement de l'épreuve, seraient essentielles pour la performance de haut-niveau, afin de gérer au mieux l'effort et ses retombées en termes de perception de l'effort (Brick *et coll.*, 2015, Brick *et coll.*, 2016b). Ces auteurs donnent notamment l'exemple de l'actuel détenteur du record de l'heure cycliste, qui lors de son record divisa son effort en cinq portions de douze minutes (compétence métacognitive proactive de planning des pensées) (Brick *et coll.*, 2016b). Cela lui permit ainsi de choisir une gestion des pensées adaptées pour les différentes parties de l'effort : au début du CLM il resta principalement focalisé sur ses sensations corporelles (Internal sensory monitoring, régulation réactive à partir des expériences métacognitives) afin de s'assurer de produire une intensité d'effort adaptée ; à l'inverse, à la fin du CLM lorsque la difficulté de l'effort était maximale, il utilisa des compétences métacognitives de planning proactif afin de rester focalisé exclusivement sur la technique de pédalage ou sur des techniques de relaxation (Active self-régulation) dans le but de diminuer au maximum la perception de l'effort. Un niveau d'expérience métacognitif important, obtenu à la suite de la réalisation de nombreux efforts autorégulés, serait notamment essentiel pour mettre en place ce type de stratégie et améliorer les performances (Brick *et coll.*, 2016b). Cependant, aucune n'étude n'a encore jamais analysé directement les relations entre focus attentionnel, perception de l'effort et performance en compétition chez des athlètes de haut-niveau. En conséquence, ces différentes hypothèses concernant l'impact du focus attentionnel sur la régulation de l'effort restent encore à vérifier.

5. Les mécanismes de régulation de l'intensité d'exercice et leur impact sur la performance d'endurance

La gestion de l'effort est le dernier élément essentiel qui n'a été abordé que de manière très superficielle par les différents modèles psychophysiologiques de la performance, et l'ensemble des sciences du sport de manière générale. En effet, bien que ces modèles prétendent tous expliquer les mécanismes à l'origine de la régulation de l'intensité d'exercice par le cerveau, très peu d'études ont réellement tenté d'analyser la gestion de l'effort chez des athlètes élités lors de compétitions officielles. Ces différents mécanismes de régulation de l'effort ont surtout été théorisés par les auteurs à l'origine du modèle du gouverneur central (St Clair Gibson *et coll.*, 2006, Tucker 2009, St Clair Gibson *et coll.*, 2018). A partir de 2006, ces auteurs revoient leur modèle et replacent la perception de l'effort au cœur des mécanismes de régulation de l'exercice, rejoignant donc le modèle psychobiologique sur un contrôle majoritairement conscient de l'effort et influencé par les paramètres psychologiques de l'athlète. En revanche, leur modèle suppose toujours que cette perception de l'effort serait principalement issue des feedbacks afférents en provenance des périphéries. En conséquence, la gestion de l'effort d'après ce modèle serait issue des échanges d'information entre le cerveau et les différents systèmes physiologiques sollicités pendant l'effort. A chaque instant de l'effort, le cerveau interpréterait les feedbacks afférents, avant d'ajuster le niveau de commande motrice efférente en réponse à ces différents retours. Cependant, il existerait un temps de latence (« time lag ») entre l'émission du signal moteur original et l'intégration du retour de feedbacks afférent par le SNC. Ce décalage temporel entre la commande et le retour d'information lié provoquerait une alternance de phases d'incertitude, lorsque le signal moteur vient d'être généré et que le retour afférent n'est pas encore intégré par le SNC, et de phases de certitude, lorsque ce retour afférent a été intégré par le cerveau et que la commande motrice va pouvoir être ajustée en conséquence (St Clair Gibson *et coll.*, 2006). La commande motrice et donc l'intensité d'effort produite seraient donc constamment ajustées avec un léger retard par rapport à l'état physiologique actuel du muscle, ce qui serait à l'origine des nombreuses oscillations observées dans le signal de puissance développée lors d'un effort en cyclisme, y compris lorsque l'athlète essaie de maintenir un niveau d'intensité d'effort constant (**Figure 20**). Tucker *et coll.* ont ainsi démontré que pour tout contre-la-montre réalisé par des cyclistes, ces oscillations de puissance présenteraient un spectre de fréquence identique et une dimension fractale similaire (Tucker *et coll.*, 2006). Ces oscillations ne représenteraient donc pas un bruit aléatoire dans

l'enregistrement tel que généralement supposé, mais illustreraient au contraire les mécanismes complexes du cerveau pour l'ajustement et le contrôle de l'intensité d'effort à partir de l'intégration des signaux afférents.

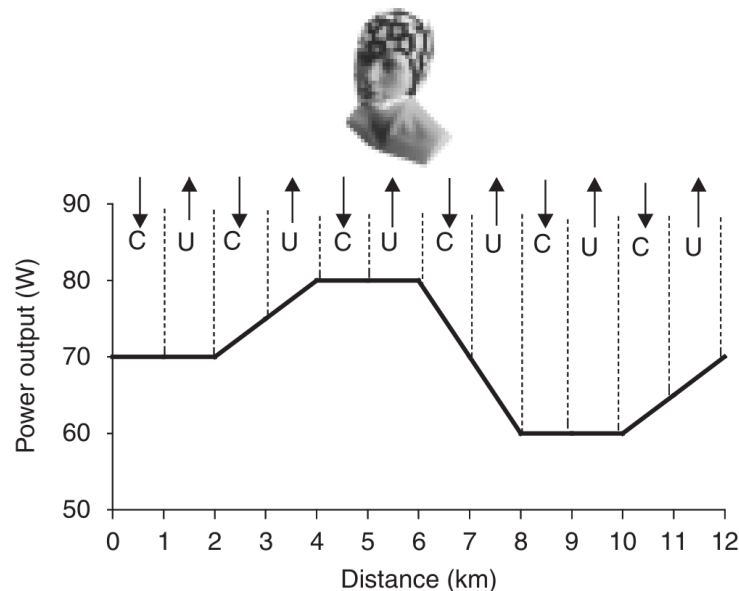


Figure 20. Représentation graphique de l'impact du décalage temporel entre la commande motrice et la réponse afférente, à l'origine des périodes de certitude (C) et d'incertitude (U), sur la puissance développée (St Clair Gibson et coll., 2006).

Ces auteurs mettent notamment ces oscillations de $P_{méca}$ au cœur des versions les plus récentes de leur modèle du gouverneur central. En effet, ils expliquent que la RPE et le contrôle conscient de l'effort est directement dépendant des fluctuations homéostatiques en provenance de l'ensemble des systèmes physiologiques de l'organisme (Tucker 2009, St Clair Gibson et coll., 2018). Ainsi, la stratégie de gestion de l'effort de l'athlète serait définie à deux niveaux. Tout d'abord, l'intensité d'effort serait choisie dans le but de maintenir une vitesse d'augmentation de la RPE optimale, afin que celui-ci atteigne le niveau maximal que l'athlète sera capable de tolérer seulement au moment de franchir la ligne d'arrivée. Cependant, au niveau de la régulation instantanée de l'intensité d'exercice, cette perception de l'effort serait influencée par les oscillations incessantes de l'ensemble des systèmes physiologiques de l'organisme (tels que la glycémie ou les concentrations hormonales) nécessaires pour le maintien dynamique de l'homéostasie (**Figure 21a**) (Tucker 2009, St Clair Gibson et coll., 2018). De plus, la RPE serait également influencé par les variations instantanées des paramètres psychologiques, tels que la motivation issue des encouragements du public, qui pourraient également permettre une stimulation psychologique plus importante à l'origine d'une

augmentation de l'intensité d'effort produite (**Figure 21b**) (St Clair Gibson *et coll.*, 2018). L'ensemble de ces oscillations entraînerait ainsi des ajustements incessants de la RPE et donc de l'intensité d'effort consenti lorsque l'athlète tente de maintenir une intensité d'effort constante, qui s'illustrerait notamment par les nombreuses fluctuations observées dans le signal de $P_{méca}$. L'ensemble de ces variations de puissance tout au long d'un effort autorégulé ne représenterait donc pas un bruit aléatoire dans le signal, mais au contraire illustrerait bien que le contrôle de l'intensité d'exercice serait issu d'un mécanisme complexe siégeant dans le cerveau et intégrant une multitude d'influence en provenance de l'ensemble de l'organisme comme du cerveau lui-même.

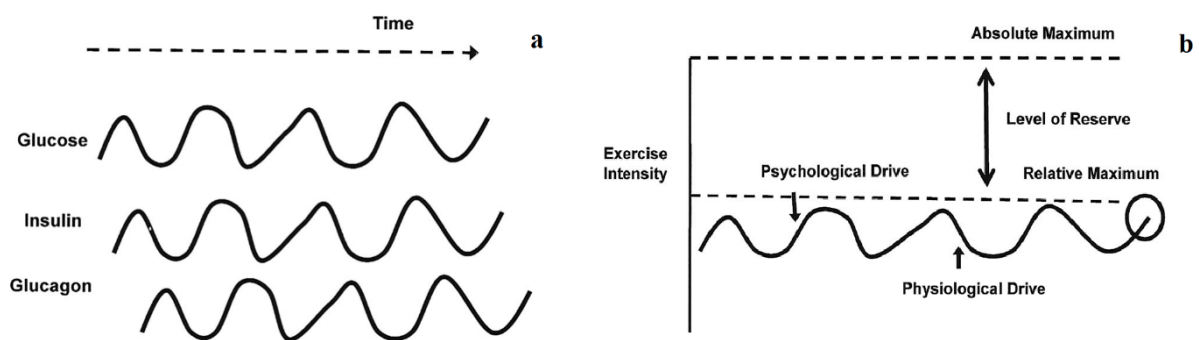


Figure 21. Représentation schématique des variations homéostatiques des différents paramètres physiologiques de l'organisme (a) et de leur impact sur la régulation de l'intensité d'exercice (b).

L'ensemble des signaux en provenance des différents systèmes physiologiques provoquerait un signal inhibiteur (« Physiological Drive ») sur la commande motrice avec l'augmentation du niveau de perturbation. À l'inverse, l'augmentation du niveau de stimulation psychologique provoquerait une augmentation instantanée du niveau d'effort consenti (« Exercise Intensity »). L'ensemble de ces variations et de ces influences serait ainsi à l'origine des nombreuses oscillations présentes dans le signal de puissance lors d'un effort autorégulé (St Clair Gibson *et coll.*, 2018).

Cependant, ces oscillations représentant le contrôle instantané de l'intensité d'exercice restent un élément particulièrement négligé par les chercheurs en science du sport. Aucune autre étude n'a tenté d'analyser plus en détail ces variations de $P_{méca}$, et aucune méthode n'a même jamais été proposée afin de quantifier de manière objective ces variations. Quelques études se sont malgré tout intéressées à la stratégie de gestion de l'effort et à son impact sur la performance, mais leur analyse est restée principalement limitée aux variations globales d'intensité d'exercice, visibles à une plus large échelle. Les premières études à ce sujet ont tout d'abord mis en évidence qu'en présence de conditions environnementales stables, une gestion de l'effort linéaire, avec une $P_{méca}$ maintenue constante tout au long de l'effort, permettrait d'optimiser les

performances pour un même niveau de contrainte physiologique (Foster *et coll.*, 1993). Cela serait notamment particulièrement valable pour les athlètes non-expérimentés qui spontanément réaliseraient un départ trop intense provoquant une fatigue et une perte de puissance trop importante sur la fin du CLM (Atkinson et Brunskill 2000). A l'inverse, l'adoption d'une stratégie linéaire permettrait de réduire les pertes biomécaniques ainsi que la fatigue périphérique liée à la sollicitation du métabolisme anaérobie pour les épreuves de plus de deux minutes (Abbiss et Laursen 2008). Cependant, d'autres études ont ensuite mis en évidence qu'en présence de conditions environnementales variables (alternance de montées/descentes sur le parcours ou de portions avec vent de dos/vent de face) une stratégie de gestion de l'effort variable permettrait d'améliorer les performances. Des études basées sur la modélisation mathématique de la performance ont ainsi mis en évidence que si les athlètes augmentaient la $P_{méca}$ lors des portions en montée ou avec vent de face et diminuaient la $P_{méca}$ lors des portions descendantes ou vent de dos, ils augmenteraient significativement leurs performances pour une même $P_{méca}$ moyenne développée (Swain 1997, Gordon 2005, Wells *et coll.*, 2013, Wells et Marwood 2016). Des études sur le terrain ont ensuite permis de confirmer ces hypothèses, cette stratégie variable serait notamment plus facile à maintenir pour les cyclistes (Cangley *et coll.*, 2011) dans la mesure où ces variations de $P_{méca}$ seraient inférieures à 5 % (Atkinson *et coll.*, 2007b).

Plusieurs études sont également parvenues à démontrer que, comme défendu par le modèle du gouverneur central, la stratégie de gestion de l'effort serait avant tout choisie dans le but de permettre une vitesse d'augmentation de la RPE optimale par rapport à la durée de l'exercice (Tucker 2009, St Clair Gibson *et coll.*, 2018). Tout d'abord, plusieurs études ont mis en évidence que si la vitesse d'augmentation de la RPE lors d'un CLM autorégulé est dépendante de la durée d'effort totale, cette vitesse d'augmentation de la RPE était en revanche similaire lorsque la durée d'effort accomplie est exprimée en pourcentage de la durée d'effort totale (**Figure 22**) (Foster *et coll.*, 2009, De Koning *et coll.*, 2011, Stone *et coll.*, 2011). Cette augmentation de la RPE suivrait ainsi toujours le même pattern ou « template » lors de l'effort : une RPE d'environ 4 sur 10 d'après l'échelle CR-10 de Borg (légèrement difficile) (Borg *et coll.*, 1985) serait atteint à partir de 25 % de la durée d'effort totale accomplie, une RPE d'environ 5,5 sur 10 (difficile) serait atteint à 50 % de la durée d'effort totale accomplie, et enfin une RPE d'environ 7 sur 10 (très difficile) serait atteint à 75 % de la durée d'effort totale accomplie avant que les valeurs maximale de 9 ou 10 sur 10 ne soient atteintes à l'arrivée (Foster *et coll.*, 2012). De Konning *et coll.* ont notamment proposé le concept de « Hazard

Score », calculé comme le produit de la RPE instantanée et de la distance restante à parcourir exprimée en pourcentage de la distance totale, qui serait utilisé pour déterminer les variations d'intensité de l'effort au cours d'un exercice autorégulé (De Koning *et coll.*, 2011). Plus ce Hazard Score serait élevé et plus l'athlète serait consciemment incité à ralentir, en raison d'une distance restante à parcourir trop importante par rapport à la RPE actuelle. A l'inverse, lorsque ce Hazard Score diminuerait et se rapprocherait de 1, l'athlète serait consciemment incité à accélérer, car la faible distance restante ne représenterait plus de risque important d'une augmentation excessive de la RPE avant la fin de l'épreuve. Ce concept de Hazard Score serait notamment cohérent vis-à-vis du end-spurt observé à la fin de toute épreuve autorégulée : l'athlète augmenterait l'intensité d'exercice en raison de la faible distance restante à parcourir, qui ne permettrait plus d'augmenter de manière trop importante la RPE avant la fin de l'effort (Foster *et coll.*, 2009, De Koning *et coll.*, 2011, Foster *et coll.*, 2012).

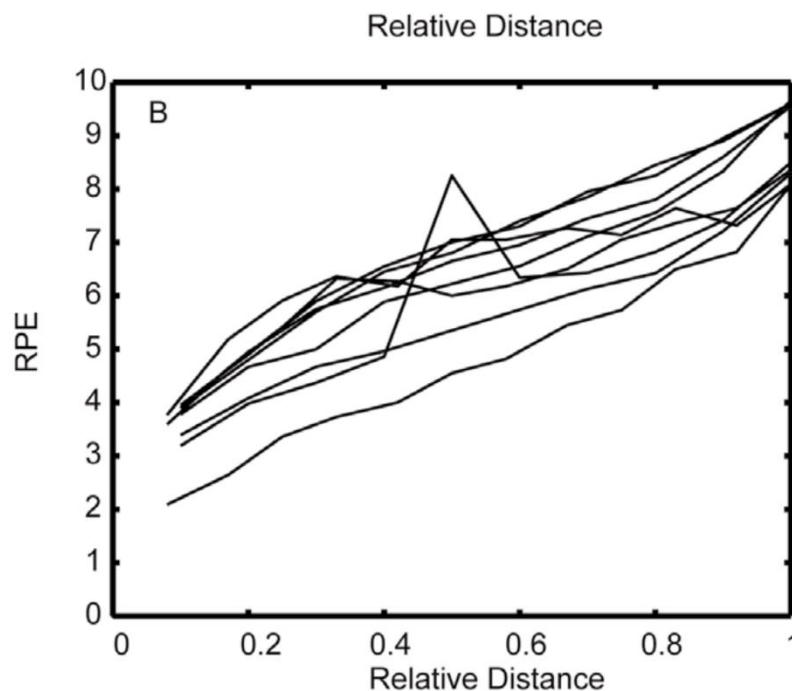


Figure 22. Evolution de la perception de l'effort (« RPE ») en fonction de la distance exprimée en pourcentage de la distance totale (« Relative distance ») pour des CLM de distances différentes (De Koning *et coll.*, 2011).

Une récente étude a également mis en évidence que ce « template » de RPE pouvait être ajusté de manière relativement efficace en instantané lorsque l'un des paramètres essentiels de la régulation de l'effort, et notamment la distance restante à parcourir, est modifiée (Schallig *et coll.*, 2017). Pour cela, les auteurs ont fait réaliser à 10 cyclistes entraînés un CLM de 10 km et

deux CLM de 15 km. Cependant, pour l'un des deux CLM de 15 km, les sujets étaient informés à l'origine que le CLM ne durait que 10 km, et n'apprenaient qu'après avoir déjà parcouru 7,5 km que la durée totale à parcourir était en réalité de 15 km (condition masqué). Dans cette condition, les sujets régulaient leur effort lors des 7,5 premiers km de manière identique au CLM de 10 km, avec une vitesse d'augmentation de la RPE similaire. Cependant, à partir du moment où les sujets étaient informés de la distance réelle restante à parcourir, ils diminuaient fortement l'intensité d'effort consentie, provoquant une stabilisation de la RPE pendant les 5 km suivant, qui ne se remettait à augmenter de nouveau que dans les deux derniers kilomètres, lorsque la RPE du CLM de 15 km atteignait un niveau équivalent à cette RPE en condition masqué (**Figure 23**). Ces résultats mettent ainsi en évidence que le « template » de RPE serait un élément particulièrement solide permettant à l'athlète de réguler l'effort de manière similaire lors de différents CLM, et que ce dernier pourrait être ajusté de manière instantanée par le sportif en cas de modification de la distance restante à parcourir ou de l'état physiologique de l'organisme.

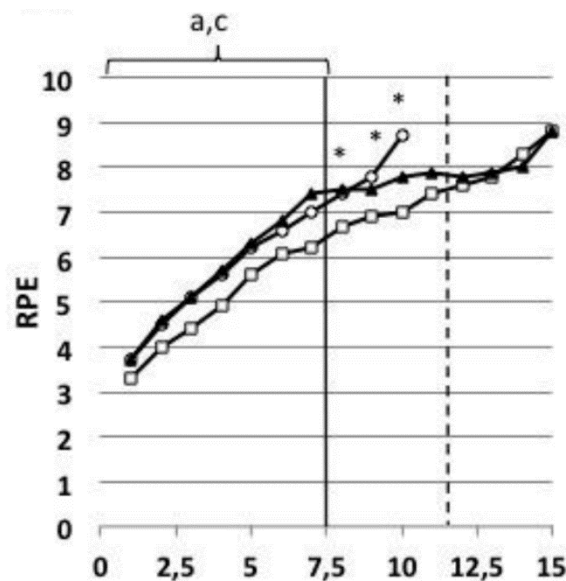


Figure 23. Evolution de la perception de l'effort (« RPE ») en fonction de la distance parcourue pour un CLM de 10 km (○), un CLM de 15 km (□) et un CLM de 15 km pour lequel les sujets pensaient jusqu'à 7,5 km parcourus que le CLM ne durait que 10 km (masqué, ▲).

On observe que pendant les 7,5 premiers km, la RPE du CLM masqué et du CLM de 10 km évoluent de manière similaire et sont significativement supérieures à celui du CLM de 15 km (a, c). Cependant, à partir du moment où les sujets étaient informés que le CLM masqué durait 15 km, leur RPE reste stable et devient significativement inférieure à celui du CLM de 10 km (*). La RPE pour ce CLM masqué ne recommence ensuite qu'à augmenter de nouveau qu'à partir du km 13, ce qui correspond au moment où la RPE lors du CLM de 15 km redevient identique à celui de la condition masqué.

Cependant, aucune étude ne s'est encore réellement intéressée aux mécanismes permettant cette régulation à court terme de l'intensité d'exercice, laissant ces stratégies de gestion de l'effort comme « le territoire inexploré de la performance sportive » (Foster *et coll.*, 1994). La méthode « Exposure Variation Analysis » ou EVA a récemment été proposée afin de quantifier à la fois la durée et l'amplitude des variations de puissance pendant l'effort (Mathiassen et Winkel 1991, Abbiss *et coll.*, 2010). Cette méthode a notamment déjà permis de montrer que la $P_{méca}$ développée par des cyclistes féminines professionnelles lors d'un championnat national du CLM était hautement variable, avec moins de 10 % d'efforts maintenus sur plus de 15 s à intensité constante sur l'ensemble du CLM (Abbiss *et coll.*, 2010). De la même manière, Peiffer et Abbiss ont déjà utilisé cette méthode pour montrer que la $P_{méca}$ développée était plus variable lors d'un CLM en ambiance chaude comparé à un CLM à température normale, en raison de capacités de régulation de l'effort davantage altérée par la fatigue en situation d'hyperthermie (Peiffer et Abbiss 2011). Cette méthode offrirait ainsi des perspectives intéressantes pour une analyse plus poussée des mécanismes de régulation de l'intensité d'exercice et de leur impact sur la performance lors d'efforts autorégulés.

6. Synthèse et objectifs de travail

Depuis la fin des années 1990, le champ des sciences du sport connaît un véritable bouleversement de paradigme concernant la prédiction de la performance d'endurance, avec l'apparition de nombreux modèles psychophysiologiques de la performance. Ces modèles mettent ainsi en évidence que la performance cycliste ne peut plus être uniquement prédite à partir de paramètres physiologiques, mais doit également prendre en compte la commande centrale à l'origine de l'effort (Noakes et St Clair Gibson 2004, St Clair Gibson et Noakes 2004, Marcora 2008a, Amann 2011, Pageaux 2014). Cependant, ces différents modèles sont en désaccord concernant les mécanismes neuronaux à l'origine du contrôle de l'effort par le SNC, et surtout ne prennent que très peu en compte les paramètres psychologiques susceptibles d'influencer la performance cycliste. En conséquence, d'autres théories (Baron *et coll.*, 2011, Brick *et coll.*, 2014, Brick *et coll.*, 2016b) doivent également être combinées à ces modèles afin de prendre en compte le rôle majeur joué par les paramètres psychologiques sur la performance cycliste de haut-niveau.

D'après l'ensemble des modèles psychophysiologiques de la performance, la perception de l'effort serait un élément clef de la fatigue et des mécanismes de régulation de l'effort. Que

cette perception de l'effort soit issue des remontées afférentes de type III et IV ou de la décharge corolaire, l'athlète choisirait une intensité d'exercice dans le but de permettre une vitesse d'augmentation de la RPE optimale, afin que cette dernière n'atteigne la valeur maximale que sa motivation lui permette de tolérer qu'à la fin de l'exercice (Tucker 2009, St Clair Gibson *et coll.*, 2018). Cette perception de l'effort serait également influencée par les paramètres psychologiques de l'athlète. Tout d'abord, les émotions positives telles que le plaisir ressenti permettrait de tolérer une intensité d'effort plus importante, en contrebalançant au sein de la charge affective de l'exercice le ressenti négatif lié à la perception de l'effort (Baron *et coll.*, 2011). Le focus attentionnel et la gestion des pensées influenceraient également la RPE et donc l'intensité d'effort consentie (Brick *et coll.*, 2014). Les athlètes experts utiliseraient notamment des stratégies de gestion des pensées leur permettant d'optimiser leurs performances (Brick *et coll.*, 2015, Brick *et coll.*, 2016b). L'ensemble des influences physiologiques et psychologiques seraient ainsi intégrées par le cerveau, ce qui pourrait expliquer les nombreuses variations et oscillations observables dans le signal de $P_{méca}$ au cours de tout effort cycliste autorégulé (Tucker *et coll.*, 2006, Tucker 2009, St Clair Gibson *et coll.*, 2018). Cependant, aucune étude ne s'est encore intéressée directement aux paramètres psychophysiologiques de la performance cycliste de haut-niveau dans des conditions réelles de compétitions. En conséquence, les théories développées par ces différents modèles doivent encore être confirmées dans le cadre d'une performance cycliste réelle en compétition de haut-niveau. De plus, aucune étude ne s'est encore intéressée à l'impact des mécanismes de régulation de l'intensité d'exercice sur la performance cycliste. Les différents objectifs de cette thèse étaient donc de :

- Proposer une nouvelle méthode permettant la quantification des fluctuations de $P_{méca}$ pour l'étude des mécanismes de régulation de l'effort en compétition officielle en cyclisme (chapitre 2, étude 1).
- Identifier les différents paramètres psychophysiologiques et de régulation de l'effort susceptibles d'influencer la performance lors d'un premier type d'exercice rencontré régulièrement par les cyclistes de haut-niveau en compétition officielle, à savoir le CLM (chapitre 3, étude 2).
- Identifier les mécanismes physiologiques et perceptifs permettant à des cyclistes de haut-niveau de réguler leur effort pendant un second type d'exercice régulièrement rencontré en compétition officielle, à savoir la répétition de montées à intensité maximale (chapitre 4, étude 3).

- Evaluer l'impact d'un mode différent de régulation de l'effort régulièrement utilisé en compétition (à savoir suivre un équipier qui régule l'allure en montée) sur la performance et les paramètres psychophysologiques de la gestion de l'effort (chapitre 5, étude 4)
- Adapter cette nouvelle méthode de quantification des fluctuations de $P_{méca}$ pour le suivi des mécanismes de régulation de l'effort et de leur impact sur la performance lors de plusieurs CLM réalisés par un même athlète (chapitre 6, étude 5 et 6)
- Définir les conditions et les limites d'utilisation de cette méthode pour l'évaluation des mécanismes de régulation de l'effort du cycliste et proposer des pistes d'explications concernant l'impact de la régulation de l'effort sur la performance en CLM (chapitre 7, étude 7 et 8).

CHAPITRE 2 : Analyse des mécanismes de régulation de l'intensité d'exercice lors de contre-la-montre en compétition officielle à l'aide de la nouvelle méthode « Exposure Variation Analysis »

Les résultats de cette étude ont fait l'objet d'une communication orale au 4^{ème} congrès international *Science and Cycling* (Ouvrard, Gros Lambert, Pinot, et Grappe, Caen, 2016) : « Short and Long Individual Time-Trials Involve Intermittent Exercise Intensity Regulation ». L'abstract de cette communication a ensuite été publié au sein de la revue *Journal of Science and Cycling*.

Résumé détaillé :

Short and Long Individual Time-Trials Involve Intermittent Exercise Intensity Regulation

Ouvrard T., Gros Lambert A., Pinot J., et Grappe F.

Introduction :

Les connaissances scientifiques sur la gestion de l'effort en CLM ont bien évolué depuis le début des années 2000. Demeurant pendant longtemps le « territoire inexploré de la performance sportive » (Foster *et coll.*, 1994), de nombreuses études ont depuis tenté d'identifier les stratégies de gestion de l'effort optimales pour améliorer les performances. A l'échelle globale de l'ensemble du CLM, même si les récentes études ont mis en évidence la nécessité de prendre en compte le profil du parcours (Swain 1997, Gordon 2005, Atkinson *et coll.*, 2007a, Atkinson *et coll.*, 2007b, Cangle *et coll.*, 2011, Wells *et coll.*, 2013, Wells et Marwood 2016), il a principalement été montré qu'en présence de conditions environnementales stables, le maintien d'une $P_{méca}$ constante serait optimal pour la performance (Foster *et coll.*, 1993, Foster *et coll.*, 1994, Atkinson et Brunskill 2000), permettant de réduire la développement de la fatigue et les pertes biomécaniques dues aux variations de vitesse (Abbiss et Laursen 2008). Cependant, Tucker *et coll.* ont mis en évidence que, même lorsqu'un

cycliste essaie de maintenir une intensité d'exercice constante, de nombreuses fluctuations sont systématiquement observables dans le signal de $P_{méca}$ (Tucker *et coll.*, 2006). Ces oscillations ne représenteraient pas un bruit aléatoire dans l'enregistrement, mais illustreraient au contraire les mécanismes complexes mis en jeu par le SNC pour le contrôle de l'intensité d'exercice (Tucker *et coll.*, 2006, Tucker 2009, St Clair Gibson *et coll.*, 2018). A chaque instant de l'effort, l'émission de la commande motrice efférente par le SNC serait suivie d'une période d'incertitude, due au fait que la perception de l'effort, permise par l'intégration du retour de feedbacks afférents, ne serait pas encore mise à jour. La période de certitude liée, essentielle pour l'ajustement de l'intensité d'exercice, ne serait donc possible que quelques instants plus tard, une fois que le SNC ait eu le temps d'intégrer le retour afférent des muscles afin de générer la perception de l'effort. L'alternance de ces phases de certitude et d'incertitude serait ainsi à l'origine des multiples oscillations de $P_{méca}$ observables lors de tout CLM (Tucker *et coll.*, 2006, Tucker 2009, St Clair Gibson *et coll.*, 2018). Cependant, aucune étude n'est jamais parvenue à confirmer ces hypothèses. La méthode « Exposure Variation Analysis » (EVA) a récemment été proposée afin d'analyser les fluctuations de $P_{méca}$ et la gestion de l'effort en CLM (Abbiss *et coll.*, 2010, Peiffer et Abbiss 2011). En quantifiant à la fois l'amplitude et la durée des oscillations de $P_{méca}$, cette méthode représente une perspective intéressante afin d'étudier les mécanismes complexes du SNC pour la régulation instantanée de l'intensité d'exercice en CLM. En conséquence, l'objectif de cette étude était d'évaluer la pertinence de l'utilisation de la méthode EVA pour l'analyse des mécanismes de régulation de l'effort lors de CLM en compétition officielle.

Méthodes :

Trois cyclistes professionnels, membres d'une équipe de niveau World-Tour ont participé à cette étude. Ces cyclistes comprenaient un spécialiste du CLM (âge : 33 ans ; taille : 1,86 m ; poids : 72 kg), un équipier grimpeur (28 ans ; 1,83 m ; 68 kg) et un grimpeur de classe mondiale, ayant déjà terminé dans le Top 10 du classement général final d'un Grand Tour (26 ans ; 1,80m ; 65 kg). Pour ces trois cyclistes, les données de $P_{méca}$ développées ont été recueillies lors du court CLM initial du Tour de France 2015 (13,8 km) et lors du long CLM du Tour de France 2013 (33,0 km) à l'aide de capteurs de $P_{méca}$ SRM (Schoberer Rad Messtechnik, Jülich, Allemagne). Les données de puissance brutes ont été analysées à l'aide de la méthode EVA grâce à une feuille de calcul Excel personnalisée. Tel que déjà présenté dans de précédentes études (Mathiassen et Winkel 1991, Abbiss *et coll.*, 2010, Peiffer et Abbiss 2011), la méthode EVA quantifie à la fois l'amplitude et la durée des fluctuations de $P_{méca}$, exprimées en pourcentage

de la durée totale du CLM. Pour cela, sept zones d'intensité d'exercice sont tout d'abord calculées pour chaque cycliste lors de chaque CLM à partir de la $P_{méca}$ moyenne développée (moins de 90 % de la $P_{méca}$ moyenne ; entre 90 et 94 % de la $P_{méca}$ moyenne ; entre 94 et 98 % de la $P_{méca}$ moyenne ; entre 98 et 102 % de la $P_{méca}$ moyenne ; entre 102 et 106 % de la $P_{méca}$ moyenne ; entre 106 et 110 % de la $P_{méca}$ moyenne ; plus de 110 % de la $P_{méca}$ moyenne). Le temps total passé dans ces différentes zones d'intensité est quantifié pour l'ensemble du CLM. De plus, la durée pendant laquelle la $P_{méca}$ est maintenue en continu au sein d'une même zone d'intensité sans changer pour une autre zone est également quantifiée et classée selon 6 zones de durée d'effort : moins de 2 s en continu au sein de la même zone d'intensité d'effort ; entre 2 et 5 s au sein de la même zone ; entre 5 et 10 s au sein de la même zone ; entre 10 et 30 s au sein de la même zone ; entre 30 s et 1 min au sein de la même zone ; plus de 1 min au sein de la même zone. Ainsi, le temps passé dans ces différentes zones d'intensité et de durée de l'effort peut être exprimé au sein d'une matrice EVA pour chaque cycliste lors de chaque CLM (exemple : **Tableau 2**).

Tableau 2. Exemple d'une matrice EVA regroupant les durées au sein des différentes zones d'intensité et de durée d'effort pour un cycliste lors du contre-la-montre initial du Tour de France 2013.

		Zones d'intensité d'effort							Total
		< 90 %	90 à 94%	94 à 98%	98 à 102%	102 à 106%	106 à 110%	> 110 %	
Zone de durée d'effort	< 2s	4,9%	7,1%	9,0%	9,6%	10,5%	9,9%	8,6%	59,6%
	2 à 5s	5,2%	0,7%	0,7%	1,4%	1,0%	1,3%	6,4%	16,8%
	5 à 10s	4,7%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,1%	4,4%	9,3%
	10 à 30s	4,4%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	6,3%	10,7%
	30s à 1min	0,5%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	2,0%	2,4%
	> 1min	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,2%	1,2%
	Total	19,7%	7,8%	9,7%	11,0%	11,6%	11,3%	28,8%	100,0%

Résultats :

Les CLM courts comme longs présentent de nombreuses fluctuations de $P_{méca}$, avec une majorité d'efforts d'une durée de moins de 2 s au sein de la même zone d'intensité ($59,6 \pm 7,2$ % de la durée d'effort total pour le CLM long et $53,3 \pm 7,4$ % pour le CLM court). De plus, on ne retrouve aucun effort d'une durée supérieure à 10 s au sein des zones d'intensité comprises entre 90 et 110 % de la $P_{méca}$ moyenne. La majorité des efforts ont été réalisés au sein des zones d'intensité extrêmes, inférieure à 90 % de $P_{méca}$ moyenne ou supérieure à 110 % de $P_{méca}$ moyenne, pour les CLM courts comme long. Cependant la répartition des durées d'effort sont différentes pour ces deux types de CLM : le CLM court présente des durées d'effort au sein de

la même zone d'intensité uniquement inférieures à 30 s, alors que le CLM long présente plusieurs efforts de plus de 30 s au sein de la même zone d'intensité ($3,6 \pm 1,5$ % de la durée totale du CLM ; **Figure 24**).

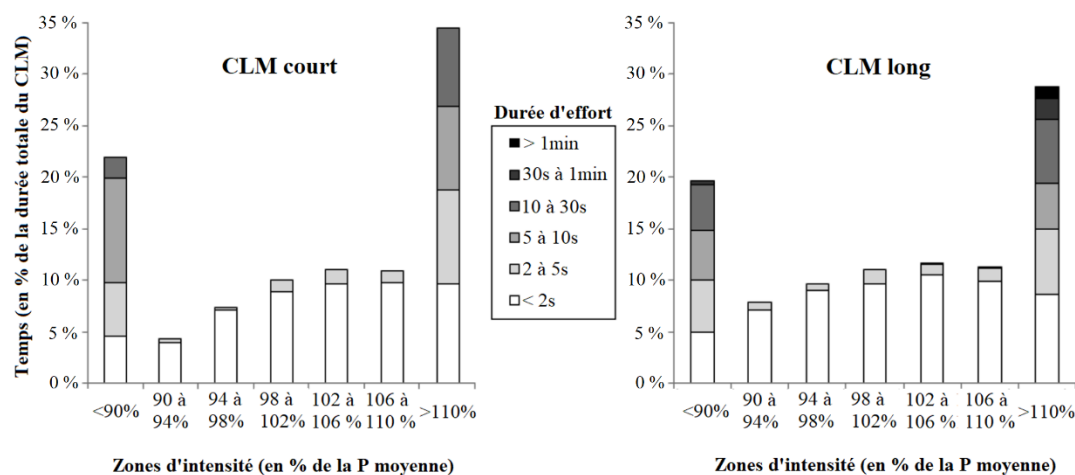


Figure 24. Analyse EVA moyenne pour trois cyclistes professionnels lors des CLM long et court du Tour de France.

Discussion :

Les résultats de cette étude montrent que les CLM en compétition officielle courts comme longs présentent de nombreuses variations de $P_{méca}$, avec la majorité des efforts à intensité constante durant moins de 2 s. Ces résultats sont en accord avec les hypothèses de St Clair Gibson *et coll.*, qui expliquent que les efforts autorégulés impliquent l'alternance de périodes de certitude et de périodes d'incertitude, durant lesquelles le SNC est dans l'attente de feedbacks en provenance des muscles sollicités afin de réguler la dépense énergétique (St Clair Gibson *et coll.*, 2006). Ainsi, pendant un CLM le cerveau ne régulerait pas l'effort de manière linéaire, mais à partir d'une multitude d'ajustement d'environ 16 W pour une $P_{méca}$ moyenne de 400 W. Les CLM courts seraient encore plus irréguliers que les CLM de longue durée, présentant davantage d'efforts brefs à intensité élevée (supérieure à 110 % de la $P_{méca}$ moyenne) ou faible (moins de 90 % de la $P_{méca}$ moyenne). Ces résultats peuvent s'expliquer par les parcours des CLM de courte durée, qui, se déroulant généralement en ville, présentent de nombreux virages à la suite desquels les cyclistes doivent produire une accélération importante afin de regagner de la vitesse le plus rapidement possible.

Conclusion et perspectives :

Les CLM courts comme longs présentent la même régulation intermittente de l'effort, avec principalement des efforts irréguliers de moins de 2 s à intensité constante et seulement quelques efforts de plus de 10 s, à intensité très élevée (supérieure à 110 % de la $P_{méca}$ moyenne) ou très faible (inférieure à 90 % de la $P_{méca}$ moyenne).

Perspectives supplémentaires non-présentes dans la publication originale : Les données issues de l'analyse EVA sont relativement denses et complexes à interpréter. Il serait intéressant afin de rendre cette méthode plus facilement utilisable pour l'analyse des mécanismes de régulation de l'effort d'en simplifier l'interprétation des résultats. Les résultats de cette étude mettent en évidence que trois types de régulation instantanée de l'effort sont particulièrement identifiable en CLM :

- Lorsque l'athlète maintient une $P_{méca}$ constante et à un niveau proche de la $P_{méca}$ moyenne du CLM (entre 90 et 110 %). Les zones de $P_{méca}$ comprises entre 90 et 110 % de la $P_{méca}$ moyenne étant relativement réduites, la majorité de ces efforts sont maintenus moins de 2 s au sein de la même zone d'intensité. Ces efforts semblent représenter 36 à 62 % de la durée totale du CLM, et représenteraient un niveau de $P_{méca}$ adapté pour le maintien d'une stratégie de gestion de l'effort constante (ainsi appelés APO, de l'anglais « accurate power output »).
- Lorsque l'athlète réalise un effort à intensité très élevée (supérieure à 110 % de la $P_{méca}$ moyenne) ou très faible (inférieure à 90 % de la $P_{méca}$ moyenne) pour une durée inférieure à 10 s en continu. Ces efforts représenteraient 29 à 52 % de la durée totale du CLM, et leur proportion varierait selon le parcours du CLM. Ils représenteraient principalement les efforts courts à intensité irrégulière permettant aux cyclistes de réguler leur allure en fonction des spécificités du parcours (virages, montées, descentes... ; ainsi appelés courtes régulations de l'effort ou REG).
- Lorsque l'athlète réalise un effort à intensité très élevée (supérieure à 110 % de la $P_{méca}$ moyenne) ou faible (inférieure à 90 % de la $P_{méca}$ moyenne) pour une durée supérieure à 10 s en continu. Ces efforts seraient ceux variant le plus selon l'athlète et le CLM concernés, représentant de 5 à 19 % de la durée d'effort totale. Les résultats de la littérature laissent supposer que ce type d'effort serait néfaste pour la performance, empêchant de maintenir un niveau de $P_{méca}$ constant (ainsi appelés IPO, de l'anglais

« Inaccurate Power Output »), ce qui augmenterait le niveau de fatigue de l'athlète (pour la zone d'intensité élevée) ou lui ferait perdre du temps (pour la zone d'intensité faible).

Nous proposons donc d'améliorer la méthode EVA afin de quantifier spécifiquement ces trois types de régulation d'intensité d'effort en CLM. Pour cela, les temps passés dans les zones d'intensité et de durée d'effort seraient additionnés afin de quantifier 1) le temps passé à APO, obtenu à partir de la somme des temps passés dans les zones d'intensité comprises entre 90 et 110 % de la $P_{méca}$ moyenne pour toutes les durées d'effort ; 2) le temps passé à IPO, obtenu à partir de la somme des temps passés à une $P_{méca}$ supérieure à 110 % de $P_{méca}$ moyenne ou inférieure à 90 % de la $P_{méca}$ moyenne pour des durées d'effort de plus de 10 s en continu ; 3) le temps passé à REG, obtenu à partir de la somme des temps passés à une $P_{méca}$ supérieure à 110 % de $P_{méca}$ moyenne ou inférieure à 90 % de la $P_{méca}$ moyenne pour des durées d'effort de moins de 10 s en continu (**Figure 25**). Les résultats de la littérature permettent d'émettre l'hypothèse que plus l'athlète serait en mesure d'augmenter le temps passé à APO et de réduire le temps passé à IPO et plus il maintiendrait une stratégie de gestion de l'effort constante, lui permettant d'améliorer ses performances grâce à une diminution de son niveau de fatigue et des pertes biomécaniques liées aux changements de vitesse (Abbiss et Laursen 2008).

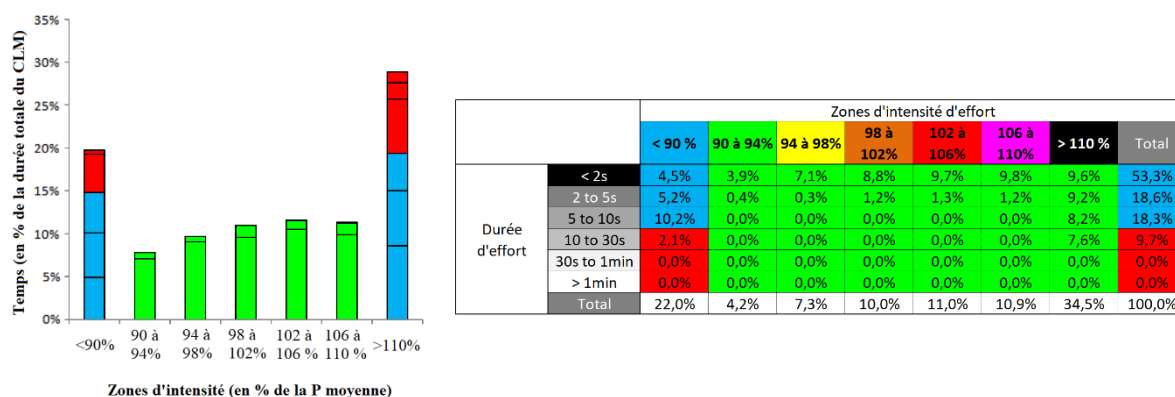


Figure 25. Détermination des indices de temps passé à un niveau de $P_{méca}$ constant (APO), de temps passé à une $P_{méca}$ trop élevée ou trop faible par rapport à cette gestion constante de l'effort sur de longues durées (IPO) et de courtes régulations d'intensité de l'effort (REG) à partir de l'analyse EVA.

En vert, les temps passés dans les zones d'intensité comprises entre 90 et 110 % de $P_{méca}$ moyenne sont additionnés afin de déterminer le temps passé à APO. En rouge, les temps passés dans les zones d'intensité inférieure à 90 et supérieure à 110 % de la $P_{méca}$ moyenne pour des durées d'effort supérieures à 10 s sont additionnés afin de déterminer le temps passé à IPO. Enfin, en bleu, les temps passés dans les zones d'intensité inférieure à 90 et supérieure à 110 % de la $P_{méca}$ moyenne pour des durées d'effort inférieures à 10 s sont additionnés afin de déterminer le temps passé à REG.

Short and Long Individual Time-Trials Involve Intermittent Exercise Intensity Regulation

T Ouvrard¹✉, A Gros Lambert¹, J Pinot², Frédéric Grappe^{1, 2}

Abstract

Pacing strategies during endurance performance is becoming one of the main topics in sport sciences. Tucker et al. (2006) reported that Power Output (PO) recordings during an individual time trial (ITT) exhibit non-random fluctuations which can be determinant for the intensity regulation by the central nervous system. Recently, Abbiss et al. (2010) proposed the "Exposure Variation Analysis" (EVA) method to study the PO variations during races. This new method expresses PO as a tridimensional distribution which allows to identify both intensity and duration of each effort realised by the cyclist. During self-paced ITT, this method offers valuable and relevant possibilities to analyse the pacing strategies and PO variations in elite cyclists to optimise their performances. Therefore, the aim of this study was to analyse the PO variations during a short and a long ITT in professional road cyclists.

Methods: Three UCI World Tour road cyclists took part in this study (1 ITT specialist, 1 world class climber and 1 domestic climber). PO data were recorded during the short initial ITT of 2015 Tour de France (13.8km) and the long ITT of 2013 Tour de France (33km). PO variations were analysed from the EVA method that quantifies both the time spent within 7 predefined intensity levels and the "acute" time for which PO was maintained within each intensity zone without changing to another level. Intensity zones were expressed in percentage of the mean PO of the ITT (<90%; 90 to 94%; 94 to 98%; 98 to 102%; 102 to 106%; 106 to 110%; >110%). Acute times were ranged from <2s; 2 to 5s; 5 to 10s; 10 to 30s; >30s.

Results: Both short and long ITT present a lot of PO variations, with a majority of time spent in <2s acute time zone ($59.6 \pm 7.2\%$ of total ITT time for the long ITT and $53.3 \pm 7.4\%$ for the short ITT). Furthermore, there is no acute effort longer than 10s for 90 to 110% PO zones. Most of the efforts were made inside extreme <90% and >110% intensity zones (respectively $31.7 \pm 6.0\%$ and $20.8 \pm 3.8\%$ of total time) for both short and long ITT but with different acute times repartition inside these two PO zones: short ITT exhibits only acute times shorter than 30s whereas long ITT exhibits several constant efforts lasting for more than 30s ($3.6 \pm 1.5\%$; figure 1).

Discussion: The main finding of this study is that both short and long ITT exhibit variable PO with most of constant efforts lasting for less than 2s. These results are consistent with the hypothesis of St Clair Gibson et al. (2006) which explain that self-paced efforts are composed of alternating periods of certainty and uncertainty (that come from both right and left lower limbs) during which the brain expects feedbacks from physiological systems in order to regulate the metabolic rate. Thus, during the ITT the brain doesn't regulate the exercise intensity linearly but with a multitude of little PO adjustments of 16W for a mean PO of 400W. The short ITT appears to be even more inconstant than the long ITT with more short efforts at intensities higher than the mean PO. These results can be related to the short ITT course which exhibits many corners where the cyclists must produce a strong acceleration to regain speed as quickly as possible.

Conclusion: Both short and long ITT present the same intermittent exercise intensity regulation with mainly inconstant efforts lasting for less than 2s and only a few longer constant efforts at intensities lower at 90% of the mean PO and higher at 110% of the latter.



T Ouvrard et al (2016). Short and Long Individual Time-Trials Involve Intermittent Exercise Intensity Regulation.

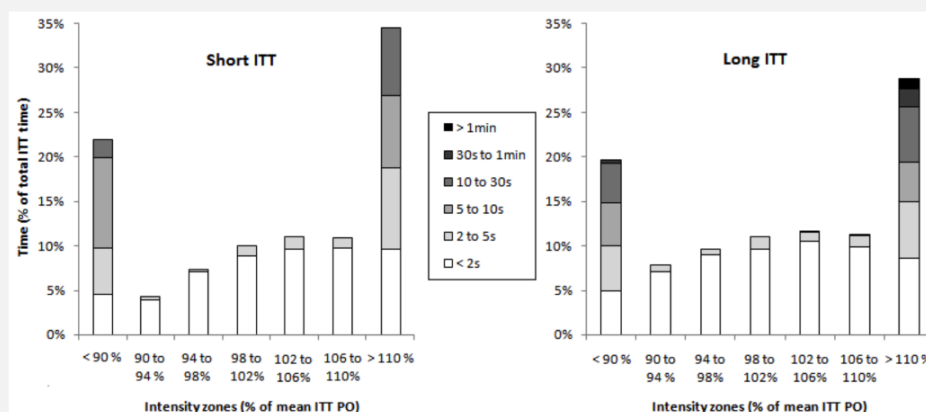


Figure 1: EVA analysis averaged for 3 professional cyclists on the same short and long Tour de France ITT

Keywords: Pacing strategy, Power Output distribution, Time Trial Performance

References

1. Abbiss C, Straker L, Quod M, Martin D, and Laursen P (2010). Examining pacing profiles in elite female road cyclists using exposure variation analysis. *Br J Sports Med* 44: 437-442
2. St Clair Gibson A, Lambert EV, Rauch LHG, Tucker R, Baden DA, Foster C, Noakes TD (2006). The role of information processing between the brain and peripheral physiological systems in pacing and perception of effort. *Sports Med* 36: 705-722.
3. Tucker R, Bester A, Lambert EV, Noakes TD, Vaughan CL, and St Clair Gibson A (2006). Non-random fluctuations in power output during self-paced exercise. *Br J Sports Med* 40: 912-917

✉ **Contact email:** ouvrard.to@gmail.com (T Ouvrard)

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

² Professional Cycling Team FDJ

CHAPITRE 3 : Déterminants psychophysiologiques de la performance cycliste lors d'un championnat national du contre-la-montre

Les résultats de cette étude ont fait l'objet d'un article accepté dans la revue *International Journal of Sports Physiology and Performance* (Ouvrard, Gros Lambert, et Grappe, 2018, *publié en ligne avant impression*) : « The Influence of Pleasure and Attentional Focus on Performance and Pacing Strategies in Elite Individual Time Trials ».

Résumé détaillé :

The Influence of Pleasure and Attentional Focus on Performance and Pacing Strategies in Elite Individual Time Trials

Ouvrard T., Gros Lambert A., et Grappe F.

Notes : Suite aux différentes remarques des reviewers, le plan de l'article soumis a été modifié afin de séparer plus clairement les parties concernant les déterminants biomécaniques, physiologiques et psychologiques de la performance. Cependant, afin de rester pertinent vis-à-vis de la thématique de cette thèse, le plan original de l'article tel que soumis en premier lieu a été conservé pour ce résumé détaillé en français.

Introduction :

De nombreuses études ont déjà tenté d'identifier les principaux déterminants de la performance en CLM cycliste (Coyle *et coll.*, 1991, Foster *et coll.*, 1993, Lucia *et coll.*, 2004, Earnest *et coll.*, 2009, Peterman *et coll.*, 2015). D'un point de vue biomécanique, la principale force résistante lors d'un CLM sur parcours plat est due à la traînée aérodynamique (Di Prampero *et coll.*, 1979). Les cyclistes doivent donc réduire leur surface frontale effective (SC_x) afin de réaliser une performance optimale. Cependant, afin de vaincre cette résistance due à l'air et être le plus rapide possible, les cyclistes doivent également développer la plus haute $P_{méca}$ moyenne possible. Il a notamment été montré que pour obtenir une bonne performance lors d'un CLM

de niveau élite, les cyclistes devaient maintenir une $P_{méca}$ moyenne comprise entre 350 et 450 W sur des durées allant jusqu'à 60 minutes (Padilla *et coll.*, 2000, Lucia *et coll.*, 2004, Earnest *et coll.*, 2009).

Maintenir un tel niveau de puissance sur des durées aussi prolongées implique de posséder un potentiel physique très développé pour les efforts d'endurance. En effet, plusieurs études ont déjà souligné que la performance en CLM était significativement corrélée à la $P_{méca}$ développée aux seuils ventilatoires (Hoogeveen et Hoogsteen 1999, Lucia *et coll.*, 2004). Cependant, Coyle *et coll.* ont démontré que la $P_{méca}$ maximale moyenne développée sur 60 minutes serait la variable déterminée en laboratoire la plus fortement reliée à la performance en CLM, permettant de prédire jusqu'à 78 % des variations de performance (Coyle *et coll.*, 1991). Récemment, Pinot et Grappe ont proposé d'utiliser la méthode du Profil de Puissance Record (PPR) afin de déterminer les $P_{méca}$ moyennes maximales qu'un cycliste est capable de développer à partir des données recueillies à l'entraînement et en compétition (Pinot et Grappe 2011). Ces auteurs suggèrent que cette méthode serait la plus fiable afin de déterminer le potentiel physique maximal du cycliste.

En ce qui concerne les aspects perceptifs et mentaux, maintenir un haut niveau de $P_{méca}$ sur une durée prolongée implique une gestion de l'effort optimale afin d'éviter toute RPE excessive et l'épuisement avant la fin du CLM (Tucker 2009, Noakes 2012). Plusieurs études ont démontré qu'une stratégie de gestion de l'effort constante, ajustée selon les principales difficultés du parcours (Foster *et coll.*, 1993, Abbiss et Laursen 2008, Cangley *et coll.*, 2011, Wells et Marwood 2016), était optimale pour la performance en CLM (Foster *et coll.*, 1993, Abbiss et Laursen 2008). Cependant, les mécanismes centraux qui permettent aux cyclistes de maintenir cette $P_{méca}$ constante restent peu étudiés (Tucker *et coll.*, 2006, Abbiss et Laursen 2008, Edwards et Polman 2013). La récente méthode EVA représente un outil intéressant pour analyser les ajustements constants de $P_{méca}$ liés aux mécanismes de régulation de l'intensité d'effort (St Clair Gibson *et coll.*, 2006, St Clair Gibson *et coll.*, 2018).

Tel que mis en évidence par les récents modèles psychophysiologiques de l'exercice d'endurance (Tucker 2009, Marcora et Staiano 2010a, Noakes 2012), les paramètres psychologiques ont également une forte influence sur la performance d'endurance. Baron *et coll.* ont notamment démontré que le plaisir et les émotions positives pouvaient contrebalancer la RPE au sein de la charge affective de l'exercice, et ainsi permettre à l'athlète de supporter des intensités d'effort plus importantes (Baron *et coll.*, 2011, Baron *et coll.*, 2015). De plus,

Brick *et coll.* ont également démontré que les pensées et le focus attentionnel étaient des éléments-clefs de la régulation de l'effort et des réponses perceptives en CLM (Brick *et coll.*, 2014, Brick *et coll.*, 2016b). L'utilisation d'un focus attentionnel optimal selon le contexte de la course permettrait notamment d'optimiser les mécanismes de régulation de l'intensité d'exercice et d'améliorer les performances (Stevinson et Biddle 1998, Corbett *et coll.*, 2012, Williams *et coll.*, 2015).

En raison de l'accès limité à des sujets sportifs de haut-niveau, les études sur les performances d'athlètes représentant l'élite de leur discipline sont rares (Pinot et Grappe 2014). Cependant, les études s'intéressant aux problématiques réelles rencontrées par les athlètes élités durant des compétitions officielles sont primordiales dans le but de proposer une approche scientifique de la performance de haut-niveau (Coutts 2017). Les résultats de ces études sont davantage susceptibles d'être réutilisés dans le cadre de pratiques professionnelles visant l'accompagnement des athlètes lors des événements sportifs les plus importants. De plus, si les déterminants de la performance en CLM ont déjà été à de nombreuses reprises étudiés chez des athlètes non-élités de niveau hétérogène, plusieurs auteurs ont mis en évidence que les relations entre la performance et ses principaux déterminants étaient différentes selon le niveau de compétition des sujets (Atkinson et Nevill 2001, Lucia *et coll.*, 2004, Impellizzeri *et coll.*, 2005). Jusqu'à présent, une seule étude, à notre connaissance, s'était déjà intéressée à la performance de cyclistes élités professionnels lors de CLM en compétition officielle (Lucia *et coll.*, 2004). Ainsi, l'objectif de notre étude était d'identifier les déterminants biomécaniques, physiques et psychologiques de la performance lors d'un championnat national du CLM élite. Dans un premier temps, les paramètres biomécaniques de $P_{méca}$ moyenne et de surface frontale ont été recueillis afin d'évaluer leur impact respectif dans la prédiction de la performance. Ensuite, les relations entre la capacité des cyclistes à développer une haute $P_{méca}$ moyenne et les indices de régulation de l'effort issus de la méthode EVA ont été analysées. Enfin, les relations entre ces indices EVA et les paramètres psychologiques de charge affective et de focus attentionnel ont été analysées. Nous avons émis l'hypothèse que 1) la $P_{méca}$ moyenne et SCx étaient fortement reliées à la performance lors du CLM, 2) les indices EVA offrent une méthode valide et intéressante afin d'évaluer la capacité du cycliste à réguler son effort de manière optimale dans le but de produire la plus haute $P_{méca}$ moyenne possible en CLM, et 3) que ces indices EVA étaient directement influencés par le focus attentionnel et la charge affective de l'athlète pendant l'épreuve.

Méthodes :

Neuf cyclistes élités (5 professionnels membres d'une équipe de niveau World-Tour, et 4 amateurs membres d'équipes de niveau élite-2) ont participé à cette étude. L'étude a été réalisée à l'occasion du championnat de France du CLM élite de 2016. Le CLM se déroulait sur un circuit de 49,3 km comprenant 570 m de dénivelé positif total. Pour chaque cycliste, la $P_{méca}$ moyenne développée pendant le CLM a été recueillie à l'aide d'un capteur SRM et exprimée à la fois en W et en pourcentage de son record maximal de puissance sur 60 minutes ($\%_{record-PPR}$), déterminé à l'aide de la méthode PPR (Pinot et Grappe 2011). Afin d'analyser plus en détail les mécanismes de régulation de l'effort, les données de $P_{méca}$ brutes ont également été analysées à l'aide de la méthode EVA telle que précédemment présentée, dans le but de quantifier les pourcentages de temps passé à APO, IPO et REG. La surface frontale (en m^2) de chaque cycliste a également été évaluée lors du CLM à l'aide de photographies, tel que proposé par Heil (Heil 2002). Enfin, les paramètres psychologiques de plaisir ressenti, RPE, charge affective et focus attentionnel ont été déterminés à l'aide de questionnaires subjectifs. Concernant le focus attentionnel, il a été demandé aux participants à la suite du CLM de quantifier leurs pensées liées 1) à leurs sensations corporelles pendant l'effort, 2) au contrôle conscient de leur action ou à des éléments extérieurs pertinents pour leur performance, et 3) à des éléments de distraction, exprimées en pourcentage de leurs pensées totales lors du CLM.

Une régression linéaire pas-à-pas à multiples variables a été réalisée afin d'identifier le meilleur modèle prédictif de la performance à partir des variables biomécaniques de $P_{méca}$ moyenne et de surface frontale. Des coefficients de corrélation de Pearson ont été utilisés afin d'analyser les relations entre les indices EVA (temps passés à APO, IPO et REG) et 1) la $P_{méca}$ moyenne exprimée en W ou en $\%_{record-PPR}$, et 2) les paramètres psychologiques de RPE, plaisir ressenti, charge affective, et catégories de focus attentionnel.

Résultats :

La performance moyenne en CLM était de 69 min 42 s $\pm$ 4 min 41 s. Les classements finaux étaient compris entre 1^{er} et 45^e pour 55 participants (comportant notamment les champion et vice-champion nationaux). La $P_{méca}$ moyenne développée était de 329 $\pm$ 40 W soit 91,3 $\pm$ 8,3 % de $\%_{record-PPR}$. La régression linéaire pas-à-pas à multiples variables a révélé que la $P_{méca}$ moyenne permettait d'expliquer 91,3 % des variations de performance (r^2 ajusté = 0,913 ; $p < 0,0001$), et que la surface frontale permettait d'expliquer 4,2 % supplémentaires de variations

de performance (r^2 ajusté = 0,955 ; $\Delta r^2 = 0,042$; $p = 0,035$), pour une prédiction totale de 95,5 %.

Les coefficients de corrélation de Pearson ont permis d'identifier des relations significatives entre la $P_{méca}$ moyenne en W et le temps passé à IPO ($r = -0,892$; $p = 0,001$), APO ($r = 0,846$; $p = 0,004$) et REG ($r = 0,744$; $p = 0,021$). Ces relations sont encore plus fortes lorsque la $P_{méca}$ moyenne est exprimée en %_{record-PPR} (respectivement $r = -0,929$; $p = 0,0003$; $r = 0,900$; $p = 0,0009$; $r = 0,767$; $p = 0,016$; **Figure 26**). Des relations significatives ont également été identifiées entre la charge affective ou le plaisir ressenti et le pourcentage de temps passé à IPO (respectivement, $r = 0,709$; $p = 0,032$ et $r = -0,746$; $p = 0,016$) ou REG (respectivement, $r = -0,770$; $p = 0,015$ et $r = 0,774$; $p = 0,014$) et entre le pourcentage de pensées liées au contrôle conscient de l'action ou à des éléments extérieurs pertinents pour leur performance et le pourcentage de temps passé à APO ($r = 0,827$; $p = 0,006$). Des tendances à la relation ont également été identifiées entre le pourcentage de pensées liées à des distractions et le pourcentage de temps passé à APO ($r = -0,619$; $p = 0,063$) ou IPO ($r = 0,577$; $p = 0,10$).

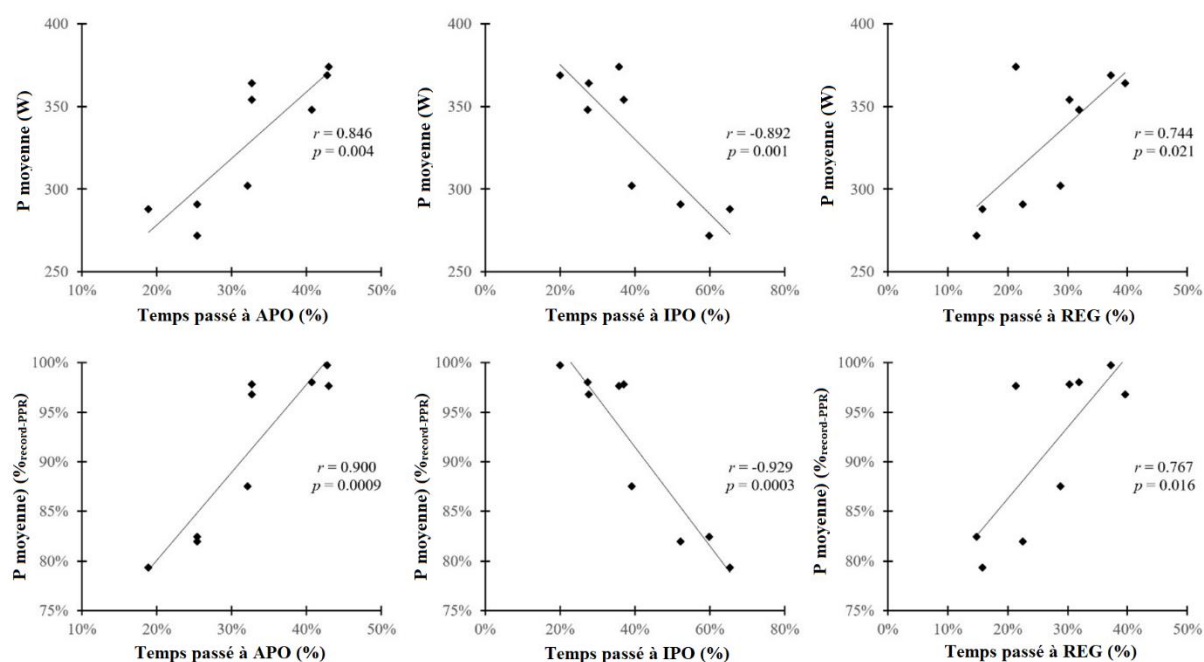


Figure 26. Relations entre les indices de l'analyse EVA (temps passés à APO, IPO et REG) et la $P_{méca}$ moyenne développée lors du CLM, exprimée en W ou en %_{record-PPR}.

Discussion :

Cette étude était la première à analyser la performance et les mécanismes de régulation de l'effort lors d'un CLM en compétition officielle de niveau élite, dont plusieurs participants étaient des spécialistes du CLM de niveau World-Tour. Nos résultats montrent que la capacité des cyclistes à développer une haute $P_{méca}$ moyenne en CLM est directement reliée à leurs mécanismes de régulation de l'effort, évalués à l'aide de la méthode EVA, et que cette régulation de l'effort est elle-même directement liée aux paramètres psychologiques de plaisir ressenti et de focus attentionnel.

Tout d'abord, nos résultats montrent que la performance lors d'un championnat national du CLM peut être prédite avec une grande précision à l'aide des variables biomécaniques de $P_{méca}$ moyenne et de surface frontale. Ces résultats sont en accord avec les équations biomécaniques de la performance cycliste (Di Prampero *et coll.*, 1979, Martin *et coll.*, 1998), mais mettent surtout en évidence le rôle majeur de la capacité du cycliste à développer une haute $P_{méca}$ moyenne pour la performance en CLM de niveau élite. Ces résultats peuvent s'expliquer par le fait que les spécialistes du CLM présentent en général des caractéristiques morphologiques proches ($68,5 \pm 3,74$ kg, CV = 5,5 %, pour une surface frontale de $0,398 \pm 0,016$ m², CV = 4,0 %) (Mujika et Padilla 2001). En conséquence, les variations de performance entre les athlètes s'expliquent principalement par leur capacité à produire une $P_{méca}$ moyenne élevée pendant le CLM, comme le montrent notamment les très hautes $P_{méca}$ moyennes développées par les quatre spécialistes du CLM de niveau World-Tour ayant participé à cette étude (de 348 à 374 W, soit de 5,0 à 5,6 W/kg sur plus d'une heure). Ces niveaux très importants $P_{méca}$ moyenne développés ont notamment permis à ces quatre athlètes de terminer dans les dix premiers du classement final de l'épreuve.

Pour être capable de produire cette haute $P_{méca}$ moyenne, les cyclistes doivent présenter un potentiel physique très important. Cependant, cette $P_{méca}$ moyenne dépend également des capacités du cycliste à avoir une utilisation maximale de son potentiel physique en compétition, comme le montre la grande variabilité de $P_{méca}$ moyenne lorsqu'exprimé en %_{record-PPR} (de 79,3 à 99,7 %). Plusieurs auteurs ont notamment affirmé que pour être capable de développer une haute $P_{méca}$ moyenne, une stratégie de gestion de l'effort optimale devait être adoptée (Foster *et coll.*, 1993, Abbiss et Laursen 2008). Nos résultats concernant l'analyse EVA semblent confirmer cette hypothèse. En effet, le pourcentage de temps passé à IPO, qui illustre chaque effort prolongé à une intensité trop élevée ou trop faible par rapport à une gestion de l'effort

constante supposée optimale, est fortement corrélé négativement à la $P_{méca}$ moyenne développée lors du CLM. A l'inverse, les temps passés à APO, qui quantifie le temps passé à une intensité d'effort constante supposée optimale, ou à REG, correspondant à tous les efforts de courte durée permettant d'éviter les efforts prolongés à IPO, sont positivement corrélés à la $P_{méca}$ moyenne. Ainsi, les cyclistes qui ont maintenu une intensité d'effort constante tout au long du CLM et qui ont réalisé seulement quelques courts efforts à $P_{méca}$ trop élevée ou trop faible ont développé une $P_{méca}$ moyenne plus élevée et ont obtenu de meilleures performances que ceux ayant davantage alterné de longues périodes à $P_{méca}$ trop élevée ou trop faible. Ces relations sont encore plus fortes lorsqu'exprimées en %_{record-PPR}. Ces résultats montrent ainsi que la capacité des cyclistes à exploiter au mieux leur potentiel physique en CLM varie grandement selon les athlètes, et est principalement déterminée par leur capacité à maintenir une gestion de l'effort constante tout au long du CLM. Si ces résultats sont en accord avec les principaux modèles psychophysiologiques de la performance d'endurance (St Clair Gibson *et coll.*, 2006, Tucker 2009, Edwards et Polman 2013), cette étude est la première à montrer que la justesse des mécanismes de régulation de l'effort, quantifiable à l'aide de la méthode EVA, serait le principal déterminant de la capacité du cycliste à exploiter au mieux son potentiel physique en CLM de niveau élite.

Les résultats de cette étude montrent également que cette capacité à réguler de manière optimale l'intensité d'exercice est directement reliée aux paramètres psychologiques de l'athlète. Tout d'abord, comme précédemment évoqué, d'après les modèles psychophysiologiques de la performance d'endurance (Tucker 2009, Marcora et Staiano 2010a, Noakes 2012), les athlètes réguleraient leur effort dans le but de choisir une intensité d'exercice permettant une vitesse d'augmentation de la RPE optimale, avec des valeurs maximales atteintes seulement à l'approche de la ligne d'arrivée, afin d'éviter un épuisement prématuré. Si aucune relation n'est identifiable entre les paramètres EVA et la RPE dans notre étude, nos résultats confortent malgré tout cette hypothèse, avec des valeurs de RPE données par les athlètes à la fin du CLM très proches de valeurs maximales ($9,2 \pm 1,0$). De plus, des relations significatives ont été identifiées entre la charge affective et le temps passé à IPO ou REG. La RPE étant similaire entre nos cyclistes à la fin du CLM, ces relations significatives sont principalement dues à la composante plaisir ressenti du calcul de la charge affective, avec une relation négative entre le plaisir ressenti et le temps passé à IPO, et une relation positive entre le plaisir ressenti et le temps passé à REG. Ces résultats confirment les hypothèses de Baron *et coll.* (Baron *et coll.*, 2011, Baron *et coll.*, 2015), démontrant qu'un plaisir important augmenterait la capacité du

cycliste à maintenir une haute $P_{méca}$ constante et à réaliser les courtes régulations nécessaires pour revenir à ce niveau d'intensité d'exercice optimal.

Une relation significative a également été identifiée entre le temps passé à APO et le pourcentage de pensées liées au contrôle de l'action ou à des éléments extérieurs pertinents pour la performance. Ces résultats sont en accord avec ceux de Stevinson et Biddle, qui avaient déjà montré que ce type de pensée était optimal pour la performance d'endurance (Stevinson et Biddle 1998). Ces auteurs expliquent notamment que ce type de focus attentionnel permettrait de maintenir l'attention sur des éléments pertinents pour la tâche, essentiels afin de réguler au mieux l'effort, tout en évitant de trop se focaliser sur les sensations corporelles qui risqueraient d'augmenter la RPE et de diminuer les performances (Corbett *et coll.*, 2012, Williams *et coll.*, 2015). De plus, des tendances à la relation ont également été identifiées entre le pourcentage de pensées liées à des distractions et la diminution du temps passé à APO et l'augmentation du temps passé à IPO. Ainsi, tel que déjà démontré par Stevinson et Biddle, ce type de focus attentionnel serait néfaste pour la régulation de l'effort, menant à une gestion hasardeuse de l'intensité d'exercice (Stevinson et Biddle 1998). Ces deux résultats confirment les hypothèses de Brick *et coll.* selon lesquelles le focus attentionnel et la gestion des pensées seraient des éléments-clefs de la régulation de l'effort pendant un CLM de niveau élite (Brick *et coll.*, 2014, Brick *et coll.*, 2016b).

Conclusion et perspectives :

La performance lors d'un CLM en compétition officielle de niveau élite est principalement déterminée par la capacité du cycliste à développer une haute $P_{méca}$ moyenne. Les mécanismes de régulation de l'effort, évalués à l'aide de la méthode EVA, ont une forte influence sur la capacité du cycliste à exploiter de manière maximale son potentiel physique pendant le CLM, et en conséquence sur sa $P_{méca}$ moyenne. Cette étude montre également que les mécanismes de régulation de l'effort sont influencés par les paramètres psychologiques de plaisir ressenti et de focus attentionnel. Ces résultats démontrent l'impact des paramètres psychologiques sur la performance d'endurance, et confirment les hypothèses des récents modèles psychophysiologiques (Tucker 2009, Marcora et Staiano 2010a, Baron *et coll.*, 2011, Noakes 2012), expliquant que ces paramètres doivent être pris en compte pour prédire la performance d'endurance. Les athlètes et les entraîneurs sur le terrain doivent également tenter d'optimiser cette régulation de l'effort et ces paramètres psychologiques lors de leurs préparations pour des compétitions CLM de niveau élite, afin de pouvoir améliorer leurs performances.

"The Influence of Pleasure and Attentional Focus on Performance and Pacing Strategies in Elite Individual Time Trials"
by Ouvrard T, Gros Lambert A, Grappe F
International Journal of Sports Physiology and Performance
© 2018 Human Kinetics, Inc.

Note. This article will be published in a forthcoming issue of the *International Journal of Sports Physiology and Performance*. The article appears here in its accepted, peer-reviewed form, as it was provided by the submitting author. It has not been copyedited, proofread, or formatted by the publisher.

Section: Original Investigation

Article Title: The Influence of Pleasure and Attentional Focus on Performance and Pacing Strategies in Elite Individual Time Trials

Authors: Theo Ouvrard¹, Alain Gros Lambert¹ and Frederic Grappe^{1,2}

Affiliations: ¹EA4660, C3S Health - Sport Department, Sports University, Besancon, France. Professional Cycling Team FDJ, Moussy le Vieux, France.

Journal: *International Journal of Sports Physiology and Performance*

Acceptance Date: September 2, 2018

©2018 Human Kinetics, Inc.

DOI: <https://doi.org/10.1123/ijspp.2017-0773>

"The Influence of Pleasure and Attentional Focus on Performance and Pacing Strategies in Elite Individual Time Trials"
by Ouvrard T, Gros Lambert A, Grappe F
International Journal of Sports Physiology and Performance
© 2018 Human Kinetics, Inc.

The Influence of Pleasure and Attentional Focus on Performance and Pacing Strategies in Elite Individual Time Trials

Original Investigation

Theo Ouvrard¹, Alain Gros Lambert¹ & Frederic Grappe^{1,2}

Affiliations:

¹ EA4660, C3S Health - Sport Department, Sports University, Besançon, France

² Professional Cycling Team FDJ, Moussy le Vieux, France

Corresponding author:

Theo Ouvrard

University of Franche-Comte

Culture – Sport – Health – Society (C3S), Health & Sport Department

UPFR Sports

31 chemin de l'épitahe

25000 Besançon

France

Tel.: +33/633/503 850

Fax: +33/384/537 838

ouvrard.to@gmail.com

Running Head: Elite cycling time-trial performance determinants

Abstract word count: 250

Text-only word count: 3646

Number of Figures: 1

Number of Tables: 3

"The Influence of Pleasure and Attentional Focus on Performance and Pacing Strategies in Elite Individual Time Trials"
by Ouvrard T, Gros Lambert A, Grappe F
International Journal of Sports Physiology and Performance
© 2018 Human Kinetics, Inc.

Abstract

Recent psychophysiological models of endurance performance explained that pacing strategies and exercise intensity regulation influence cyclists' ability to produce high mean power output (PO) during time-trial. However, the relationships between these pacing strategies and psychological parameters of the athletes remain unknown. **Purpose:** The aims of this study were to 1) determine the impact of pacing strategies on cyclists' mean PO during an elite time-trial championship and 2) identify the relationships between these pacing strategies and psychological parameters. **Methods:** Mean power output, projected frontal area, attentional focus and pleasure were recorded for nine male cyclists during an official ITT national championship. Pacing regulations were quantified from PO using the new Exposure Variation Analysis (EVA), which determines times spent at adapted PO (APO) and inaccurate PO (IPO) for optimal constant pacing strategy. Relationships between mean PO, times spent at APO and IPO and psychological variables were analysed. **Results:** Significant relationships were found between mean PO and EVA pacing parameters (r^2 from 0.56 to 0.86; $p > 0.05$). Time spent at IPO was negatively related to pleasure during the ITT ($r = -0.746$; $p = 0.016$). Conversely, time spent at APO was significantly related to cyclists' attentional focus ($r = 0.827$; $p = 0.006$). **Conclusions:** Mean PO during elite ITT is directly related to the athletes' ability to optimally regulate pace throughout the event. This pacing regulation is influenced by attentional focus and pleasure, underlining that coaches and athletes should devote greater attention to these psychological parameters in order to improve their performances.

Keywords: Power output, Pacing strategies, Rating of Perceived Exertion, Exposure Variation Analysis, Attentional focus, Projected frontal area.

“The Influence of Pleasure and Attentional Focus on Performance and Pacing Strategies in Elite Individual Time Trials”
by Ouvrard T, Gros Lambert A, Grappe F
International Journal of Sports Physiology and Performance
© 2018 Human Kinetics, Inc.

Introduction

Several studies have already demonstrated that cycling individual time-trial (ITT) performance can be predicted from the biomechanical parameters of effective frontal area and mean power output (PO).¹⁻³ As the main parameter determining aerodynamic resistive force, effective frontal area consequently determines more than 90% of the total resistive force impeding the forward motion of the cyclist during flat ITT.⁴ In parallel, to overcome this resistance and be as fast as possible, cyclists must also produce the highest mean PO possible. To achieve an optimal performance during elite ITT, cyclists must sustain a mean PO ranging from 350 to 450 W for up to 60 min.^{2,5,6}

It is now well-known that maintaining a high PO over a prolonged period of time involves a good regulation of exercise intensity throughout the event, generally called pacing-strategy.^{7,8} Results of the literature are still a little bit conflicting concerning the optimal pacing strategy for ITT. While some authors explained that, for ITT under steady environmental conditions, maintaining a constant PO is optimal to reduce biomechanical losses and fatigue,^{7,9,10} it has also been demonstrated that, for hilly ITT, increasing PO in uphill sections and decreasing PO in downhill sections improves performance.¹¹⁻¹³ The “Exposure Variation Analysis” (EVA) method was recently proposed as a new innovative way to study exercise intensity regulation during ITT, quantifying the duration and amplitude of each variation in the PO signal.^{14,15} This method appears to offer an interesting way to further investigate the continuous adjustments of PO related to the cyclists’ pace control and its impact on performance.^{16,17}

As evidenced by recent psychophysiological models of exercise,¹⁸⁻²⁰ pacing strategies and performance during endurance events are directly influenced by psychological parameters. All these models defended that rating of perceived exertion (RPE) is the key factor allowing athletes to regulate pacing strategy. To achieve a maximal performance, cyclists must maintain

“The Influence of Pleasure and Attentional Focus on Performance and Pacing Strategies in Elite Individual Time Trials”
by Ouvrard T, Gros Lambert A, Grappe F
International Journal of Sports Physiology and Performance
© 2018 Human Kinetics, Inc.

the exercise intensity which allows an optimal rise of RPE, with maximal values reached only as the athlete approaches the end of the event, in order to avoid exhaustion before the end of the ITT. Baron et al.^{21,22} explained that pleasure and positive emotions could also balance negative affective responses and RPE and allow the athletes to sustain higher exercise intensity during the effort. These authors proposed the concept of affective balance, defined as the difference between RPE and pleasure, which is supposed to determine the exercise intensity that athletes are able to sustain during exercise.²² When athletes reach maximal values of affective balance, due to an excessive RPE or a reduced pleasure, they will reduce exercise intensity. Conversely, decreasing affective balance by increasing the pleasure felt will allow the athletes to sustain higher exercise intensity.

Furthermore, Brick et al.²³ demonstrated that cognitions and attentional focus are core elements of exercise intensity regulation during ITT. They demonstrated that an excessive part of thoughts related to bodily sensations (called internal sensory monitoring) increases RPE and consequently decreases performance during endurance events.²⁴ Conversely, use of external keys to regulate exercise intensity (e.g. behaviour of the opponent or speed feedback, called outward monitoring of the performance) or active self-regulation (e.g. thoughts related to technique, cadence, or strategy) decreases RPE and increases the exercise intensity sustained by the athlete.^{25,26}

Due to limited access to top-level athletes, studies about the performances of athletes who represent the true elite of their discipline are rare. However, in order to develop an evidence-based practice in high-performance sport, ecological studies that investigate relevant issues encountered by high-performance athletes during competitions are extremely interesting.²⁷ The results of this kind of studies are more likely to be translated to professional practice and to result in improved athlete management and performance during the most important competitions. To the best of our knowledge, only one study has already tried to

“The Influence of Pleasure and Attentional Focus on Performance and Pacing Strategies in Elite Individual Time Trials”
by Ouvrard T, Gros Lambert A, Grappe F
International Journal of Sports Physiology and Performance
© 2018 Human Kinetics, Inc.

analyse elite professionals' official ITT competition performances.² Furthermore, if as described above, biomechanical determinants of ITT performance were well studied, the true impact of pacing strategy on elite ITT performance, and its relationship with psychological determinants of performance, remain unknown. Accordingly, the aims of this study were to determine the impact of pacing strategies on cyclists' mean PO during an elite time-trial championship and to identify the relationships between these pacing strategies and psychological parameters. Firstly, mean PO and frontal area biomechanical parameters were recorded in order to identify their predictive capacity for ITT performance. Secondly, relationships between EVA pacing analysis and cyclists' ability to produce high mean PO during the ITT were assessed. Finally, relationships between these pacing parameters and the psychological variables of affective balance and attentional focus were analysed. We hypothesised that 1) mean PO and frontal area are strongly related to ITT performance, 2) EVA provide a valuable and reliable measurement of how the cyclist is able to regulate exercise intensity in order to develop the highest mean PO possible, and 3) the EVA pacing parameters are directly influenced by attentional focus and affective balance during the ITT.

Methods

Subjects

Nine elite male cyclists volunteered to take part in this study. Five of them were members of UCI professional teams (mean age, height, body mass and VO_2max were respectively 29.4 ± 4.0 years, 184 ± 4 cm, 69.6 ± 2.7 kg and $74.0 \pm 6.6 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$) and four were members of elite-2 amateur teams (21.0 ± 2.4 years, 183 ± 7 cm, 69.0 ± 3.6 kg and $70.5 \pm 4.2 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$). All of them were ITT specialists who had prepared the ITT race as one of the main objectives of their competitive season. Prior to participating to the study, each participant provided written informed consent, which was conducted in accordance with the

“The Influence of Pleasure and Attentional Focus on Performance and Pacing Strategies in Elite Individual Time Trials”
by Ouvrard T, Gros Lambert A, Grappe F
International Journal of Sports Physiology and Performance
© 2018 Human Kinetics, Inc.

ethical principles of the Declaration of Helsinki and approved by the institutional ethics committee.

Study design

This study took place around the 2016 French national ITT championship. To ensure that the elite athletes' competition routines and performances weren't influenced by the study protocol, there wasn't any intervention of the experimenters during the entire ITT, warm-up or previous trainings of the participants. The ITT course included a one-lap circuit of 49.3 km for 570 m of total elevation gain. The race was part of the UCI official calendar and was used to determine the 2016 French national ITT champion. All of the competitors started the ITT separated by two-minute intervals, with less than two hours between the first and the last start. The weather conditions remained stable during the event, with a mean temperature of 33.9°C, 41% humidity, no chance of precipitation, and a light wind at an average speed of 7.3 km·h⁻¹.

Time-trial power output measurement

Each cyclist performed the ITT with a mobile SRM power meter (Schoberer Rad Meßtechnik, Julich, Germany) mounted on their personal ITT bike. To ensure accurate measures, a static calibration was applied before the study for each power meter and the zero-offset frequency was adjusted according to the manufacturer's instructions. During the entire ITT, PO (W) and cadence (rpm) were measured continuously at a frequency of 1 Hz thanks to Garmin Edge 800 device (Olathe, USA).

Power output data analysis

ITT SRM files were analysed using TrainingPeaks software (WKO+, v3.0, Peakware, CO, USA) to determine the ITT mean PO. Mean PO were expressed in both watts (W) and percentage of cyclists' sixty-minutes Power Profile Record during the 2016 cycling season (Mean-PO%), determined using longitudinal PO follow-up according to the method of Pinot

“The Influence of Pleasure and Attentional Focus on Performance and Pacing Strategies in Elite Individual Time Trials”
by Ouvrard T, Gros Lambert A, Grappe F
International Journal of Sports Physiology and Performance
© 2018 Human Kinetics, Inc.

and Grappe.²⁸ This method has been shown as valid to determine cyclists' maximal physical capacities from a longitudinal follow-up thanks to portable power meter mounted on cyclists' personal bikes, and is commonly used with elite cyclists.^{28,29} Consequently, Mean-PO% was used to quantify the cyclists' ability to make the most of their physical capacities during the ITT.

To further investigate exercise intensity regulation, raw power output data were also computed using the EVA method, as previously proposed by Abbiss et al..¹⁴ In brief, EVA quantifies PO fluctuations' duration and amplitude as an expression of the overall ITT time. To process this, seven exercise intensity zones were calculated for each participant from his ITT mean PO¹⁵ (< 90%; 90 to 94%; 94 to 98%; 98 to 102%; 102 to 106%; 106 to 110%; > 110%). The total amount of time spent within each zone was recorded. In addition, the period for which PO was maintained in each intensity zone, without changing to another one, was also quantified and ranged from < 2s; 2 to 5 s; 5 to 10 s; 10 to 30 s; >30 s. Thus, the time spent inside each intensity and time zone was expressed into an EVA matrix (e.g. Table 1) for each cyclist. To facilitate exercise intensity regulation interpretations, times spent inside the different zones were summed for 1) adapted PO for optimal constant pacing strategy (APO; PO values between 90% and 110% of mean PO), 2) prolonged efforts at inaccurate PO regarding optimal constant pacing strategy (IPO; PO < 90% or > 110% of mean PO for more than 10 s continuously) and 3) short-time regulation to avoid prolonged effort at inaccurate PO (REG; PO < 90% or > 110% of mean PO for less than 10 s continuously).

Projected Frontal Area determination

During the ITT, the projected frontal area (A_p) of each participant was determined by using photographs as proposed by Heil³⁰ and as commonly used in numerous studies.^{1,31} Digital pictures of the cyclists in aerodynamic position (seated and with their hands on the aero

"The Influence of Pleasure and Attentional Focus on Performance and Pacing Strategies in Elite Individual Time Trials"
by Ouvrard T, Gros Lambert A, Grappe F
International Journal of Sports Physiology and Performance
© 2018 Human Kinetics, Inc.

handlebars) were taken during the ITT with a high-definition camera (Nikon, Tokyo, Japan). The area enclosed by the cyclist and his bicycle was delimited using a computer-based image analysis software application (ImageJ, National Institutes of Health, Bethesda, USA). After a calibration against a known distance, the software automatically calculates the area of the given tracing. The calibration distance used in this study was the length of the inflated front wheel of the bike (0.675 m). Pictures were taken twice on the ITT, at the beginning of the course (km 12) and in the final kilometres (km 47.3). Ap values were averaged from the two pictures for each participant. The photograph spots were selected in order to enhance light contrast between the cyclist and the picture background and to facilitate Ap determination with the analysis software. Each picture was analysed three times by three different investigators. Ap values were averaged for each trial to obtain picture mean Ap. The Ap variation between two analyses of a same picture was ranged from 0 to 0.012 m² (2.9%).

Affective balance determination

Immediately after the ITT, the participants were asked to rate their RPE in the last kilometre of the ITT and their mean pleasure during the ITT using Borg's category-ratio scale (CR-10),³² as proposed by Baron et al..²² Maximal affective balance during the ITT was then obtained by subtracting mean pleasure to RPE as already used in a previous study.²²

Attentional focus assessment

Attentional focus during the ITT was assessed from subjective questionnaires. The participants were asked to quantify their thoughts related to: 1) internal sensory monitoring (e.g. breathing, muscle soreness or fatigue), 2) outward monitoring or active self-regulation of their performance (e.g. strategy, split times, or actual speed), and 3) distraction (e.g. daydreams, spectators or imagining music), expressed as a relative percentage of their total ITT thoughts.

"The Influence of Pleasure and Attentional Focus on Performance and Pacing Strategies in Elite Individual Time Trials"
by Ouvrard T, Gros Lambert A, Grappe F
International Journal of Sports Physiology and Performance
© 2018 Human Kinetics, Inc.

This classification was based on Brick *et al.*^{23,33} and Stevinson and Biddle's recommendations²⁴ and was similar to those used in previous studies.^{26,34,35}

Statistical analysis

Descriptive statistics were used, and all data were expressed as mean $\pm$ standard deviation (SD). Statistical analyses were performed using Xlstat-Base software (Addinsoft SARL, Paris, France). Kolmogorov-Smirnov-Lilliefors tests were applied to ensure Gaussian distribution of the data. A multivariate stepwise regression analysis was performed to identify the strongest predictive model for ITT performance (in seconds) from biomechanical parameters (mean PO and A_p). Relationships between EVA parameters (percentages of time spent at APO, IPO and REG) and 1) mean PO and Mean-PO% and 2) RPE, pleasure, affective balance, and times spent in the different attentional focus categories were assessed thanks to Pearson correlations coefficients. The alpha value for those analyses was set at $p < 0.05$.

Results

Mean ITT time was 69'42" $\pm$ 4'41". Final rankings ranged from 1st to 45th place for 55 participants (1st and national ITT champion, 2nd, 7th, 8th, 14th, 25th, 33rd, 34th, 45th). Mean ITT PO was 329 $\pm$ 40 W, for a Mean-PO% of 91.3 $\pm$ 8.3% (from 79.3 to 99.7%). Mean values for all collected variables are presented in Table 2. Multivariate stepwise regression analysis revealed that mean PO explained 91.3% of performance variability (adjusted $r^2 = 0.913$; $p < 0.0001$) and A_p explained 4.2% of additional variability (adjusted $r^2 = 0.955$; $\Delta r^2 = 0.042$; $p = 0.035$), for an overall 95.5% of performance variability explained by the model (adjusted $r^2 = 0.955$; $p < 0.0001$).

Pearson correlation coefficients revealed significant relationships between mean PO and the percentage of time spent at IPO ($r = -0.892$; $p = 0.001$), APO ($r = 0.846$; $p = 0.004$) and REG ($r = 0.744$; $p = 0.021$). These relationships were stronger between Mean-PO% and the

"The Influence of Pleasure and Attentional Focus on Performance and Pacing Strategies in Elite Individual Time Trials"
by Ouvrard T, Gros Lambert A, Grappe F
International Journal of Sports Physiology and Performance
© 2018 Human Kinetics, Inc.

percentage of time spent at IPO ($r = -0.929$; $p = 0.0003$), APO ($r = 0.900$; $p = 0.0009$) or REG ($r = 0.767$; $p = 0.016$, Figure 1). Significant relationships were also identified between affective balance or pleasure and the percentage of time spent at IPO (respectively, $r = 0.709$; $p = 0.032$ and $r = -0.746$; $p = 0.016$) or REG (respectively, $r = -0.770$; $p = 0.015$ and $r = 0.774$; $p = 0.014$) and between the percentage of thoughts related to outward monitoring and active self-regulation of the performance and the percentage of time spent at APO ($r = 0.827$; $p = 0.006$). Trends to relationships were also identified between the percentage of thoughts related to distraction and time spent at APO ($r = -0.619$; $p = 0.063$) and IPO ($r = 0.577$; $p = 0.10$, Table 3).

Discussion

To the best of our knowledge, this study is the first to analyse performance and pacing strategies during elite official competitive ITT performed by several World-class ITT specialists. Our results show that cyclists' ability to develop high mean PO during ITT are directly related to pacing strategies evaluated thanks to the EVA method, and that these pacing strategies are influenced by the psychological parameters of pleasure and attentional focus.

Firstly, our results showed that, during elite ITT championship, multivariate models, including mean PO and A_p provided a very accurate prediction of ITT performance, with 95.5% of overall variability explained. If this model is in accordance with the biomechanical equations of the motion of cyclists,⁴ it also underlines that ITT elite performance is more related to mean PO, with 91.3% of performance variability explained, than to A_p , which added only 4.2% of additional variability. This latter result can be explained by the fact that ITT specialists exhibit similar morphotypes, with low variability on body mass (68.5 ± 3.74 kg, CV = 5.5%) and A_p (0.398 ± 0.016 m², CV = 4.0%).³⁶ Thus, the performance variability can only be explained by the athlete's ability to produce a high mean PO, as shown by the extremely high mean PO of

“The Influence of Pleasure and Attentional Focus on Performance and Pacing Strategies in Elite Individual Time Trials”
by Ouvrard T, Gros Lambert A, Grappe F
International Journal of Sports Physiology and Performance
© 2018 Human Kinetics, Inc.

our four world-class ITT specialists (from 348 to 374 W or 5.0 to 5.6 W/kg over more than 1 h), who all finished the race in the top-ten final ranking.

Several authors defended that to be able to produce this very high mean PO, an optimal constant pacing strategy must be adopted.^{7,9} Our results concerning the pacing strategy analysis using the EVA method tend to confirm this hypothesis. Indeed, the percentage of time spent at IPO, which illustrates every prolonged effort at a too high or too low PO regarding an optimal constant pacing strategy, was strongly negatively related to mean ITT PO. Conversely, the percentages of time spent at APO, which quantifies every effort toward an optimal constant PO, or at REG, corresponding to every short-time effort regulation to avoid a too low or too high PO for prolonged time, were positively related to mean PO. Thus, the cyclists who maintained constant optimal intensity effort and performed only short-time regulations of fluctuating PO for most of the ITT developed a higher mean PO and achieved better performances than those who alternated more long-time efforts at too low or too high intensities. These relationships were even stronger when expressing mean PO as a percentage of cyclists sixty-minute Power Profile Record (Mean-PO%, Figure 1). Added to the broad range of Mean-PO% amongst our participants (from 79.3 to 99.7%), these relationships underline the fact that the cyclists' ability to have a maximal use of their physical capacities during elite ITT widely differs between competitors and is mainly determined by their ability to maintain a constant optimal PO throughout the ITT. If those results are hypothesized in most modern psychophysiological models of endurance performance,^{8,16,19} this study is the first, to the best of our knowledge, to demonstrate that pacing strategies and exercise intensity regulation, quantified using EVA method, are the main determinants of the cyclists' ability to have a maximal use of their physical capacities during elite ITT competitions.

Consequently, the EVA method appears to be a very interesting tool for coaches and athletes who want to improve their ITT performances and for future research to further analyse

“The Influence of Pleasure and Attentional Focus on Performance and Pacing Strategies in Elite Individual Time Trials”
by Ouvrard T, Gros Lambert A, Grappe F
International Journal of Sports Physiology and Performance
© 2018 Human Kinetics, Inc.

the mechanisms of exercise intensity regulation. However, since this study was the first to employ this method and to identify its strong relationships with cyclists' ability to have a maximal use of their physical capacities, those results must be interpreted with caution. Further studies are needed to verify if these EVA parameters are related to mean PO in varied contexts of ITT (e.g. different lengths or total elevation gains on the ITT course, specific stage-race ITT, etc.) and at several levels of competition.

The results of this study also underline that this ability to optimally regulate exercise intensity is directly related to psychological parameters (Table 3). Firstly, most of the recent models of endurance performance¹⁸⁻²⁰ explained that exercise intensity during long-distance events is regulated from athletes' RPE. To optimise their performances, athletes try to choose an appropriate exercise intensity which allows an optimal rise of RPE, with maximal values only reached as the cyclist approaches the finishing line, in order to avoid exhaustion before the end of the ITT. If no relationship was found between EVA pacing parameters and RPE, our results still support this hypothesis, as the RPE given at the end of the ITT by our participants were very close to maximal values (9.2 ± 1.0 , Table 2). Furthermore, significant relationships were found between affective balance and the percentage of time spent at IPO and REG. As RPE values were similar between participants, these relationships were mainly due to the pleasure dimension of the affective balance, with negative relationship between pleasure and the percentage of time spent at IPO and positive relationship between pleasure and the percentage of time spent at REG. Baron et al.^{21,22} already evoke that the intensity an athlete is able to maintain during exercise isn't only linked to RPE but also to positive emotions. These authors explained that a high pleasure could balance negative affective responses and RPE and allow the athlete to sustain high constant exercise intensity over longer period of time. Our results confirmed the assumptions of this model, showing that a higher pleasure increase

“The Influence of Pleasure and Attentional Focus on Performance and Pacing Strategies in Elite Individual Time Trials”
by Ouvrard T, Gros Lambert A, Grappe F
International Journal of Sports Physiology and Performance
© 2018 Human Kinetics, Inc.

cyclists' ability to maintain a constant high PO and to perform short-term regulations to revert to this optimal level of exercise intensity during ITT.

A significant relationship was also found between time spent at APO and the percentage of thoughts related to outward monitoring and active self-regulation of the performance. These results are in accordance with Stevinson and Biddle,²⁴ who showed that this kind of thoughts regulation is optimal for endurance performance and effort management. These authors explained that this attentional focus allows the athlete to maintain attention on the task, which is essential to correctly regulate exercise intensity, but without focusing too much on body and effort related perception, which were shown to increase RPE and decrease performance during ITT.^{25,26} Additionally, even if these relationships were not significative, we observed trends to negative relationship between percentage of thoughts related to distractions and time spent at APO and to positive relationship between these distractions and time spent at IPO. Consequently, as already suggested by Stevinson and Biddle,²⁴ these distraction thoughts seem to be detrimental for an optimal regulation of exercise intensity, leading to more hazardous regulation of pace. These two results confirm the hypothesis of Brick et al.,^{23,33} which suggested that attentional focus is a core element of exercise intensity regulation during ITT.

Practical applications

The results of this study show that cyclists' ability to have a maximal use of their physical capacities during elite ITT championship is directly linked to their regulation of exercise intensity throughout the effort. As this ability to optimally regulate pace is directly influenced by pleasure or attentional focus, coaches and athletes should devote greater attention to these psychological parameters to improve their ITT performances. Exercise intensity regulation ability monitoring, thanks to the EVA method, or training on emotional and thoughts

“The Influence of Pleasure and Attentional Focus on Performance and Pacing Strategies in Elite Individual Time Trials”
by Ouvrard T, Gros Lambert A, Grappe F
International Journal of Sports Physiology and Performance
© 2018 Human Kinetics, Inc.

control (e.g. with specific self-talk or coping strategies) can be added to the physical training and physiological monitoring that occur during specific elite ITT preparation.

Conclusions

Performance during elite ITT competitions is mainly determined by the cyclists' ability to produce high mean PO. Pacing strategies and exercise intensity regulation throughout the race, evaluated thanks to the new EVA method, have a strong influence on the cyclists' ability to have a maximal use of their physical capacities during the race, and consequently on this mean PO. This study also shows that this regulation of pace is influenced by attentional focus and pleasure. These results underline the impact of psychological parameters on elite ITT performance, and confirm the hypothesis of recent psychophysiological models of endurance performance,¹⁸⁻²¹ which explain that these psychological parameters must be taken into account when analysing and predicting performance.

Acknowledgments

The authors wish to thank the participating cyclists and their respective coaches for their cooperation, Julien Jacques from ERIC laboratory at Lyon-Lumière University for his assistance with the statistical analysis of the data and Arnaud Perrin for his assistance with the manuscript redaction. This research was not supported by external funding. The authors declare no conflict of interest. The results of the current study do not constitute endorsement of the product by the authors or the journal.

“The Influence of Pleasure and Attentional Focus on Performance and Pacing Strategies in Elite Individual Time Trials”
by Ouvrard T, Gros Lambert A, Grappe F
International Journal of Sports Physiology and Performance
© 2018 Human Kinetics, Inc.

References

1. Peterman JE, Lim AC, Ignatz RI, Edwards AG, Byrnes WC. Field-measured drag area is a key correlate of level cycling time trial performance. *PeerJ*. 2015;3:e1144.
2. Lucia A, Hoyos J, Perez M, Santalla A, Earnest CP, Chicharro JL. Which laboratory variable is related with time trial performance time in the Tour de France? *Br J Sports Med*. 2004;38(5):636-640.
3. Coyle EF, Feltner ME, Kautz SA, et al. Physiological and biomechanical factors associated with elite endurance cycling performance. *Med Sci Sports Exerc*. 1991;23(1):93-107.
4. di Prampero PE, Cortili G, Mognoni P, Saibene F. Equation of motion of a cyclist. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol*. 1979;47(1):201-206.
5. Earnest CP, Foster C, Hoyos J, Muniesa CA, Santalla A, Lucia A. Time trial exertion traits of cycling's Grand Tours. *Int J Sports Med*. 2009;30(4):240-244.
6. 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):850-856.
7. Abbiss CR, Laursen PB. Describing and understanding pacing strategies during athletic competition. *Sports Med*. 2008;38(3):239-252.
8. Edwards AM, Polman RC. Pacing and awareness: brain regulation of physical activity. *Sports Med*. 2013;43(11):1057-1064.
9. Foster C, Snyder AC, Thompson NN, Green MA, Foley M, Schrager M. Effect of pacing strategy on cycle time trial performance. *Med Sci Sports Exerc*. 1993;25(3):383-388.
10. Wells M, Atkinson G, Marwood S. Effects of magnitude and frequency of variations in external power output on simulated cycling time-trial performance. *J Sports Sci*. 2013;31(15):1639-1646.
11. Wells MS, Marwood S. Effects of power variation on cycle performance during simulated hilly time-trials. *Eur J Sport Sci*. 2016;16(8):912-918.
12. Atkinson G, Peacock O, Law M. Acceptability of power variation during a simulated hilly time trial. *Int J Sports Med*. 2007;28(2):157-163.
13. Swain DP. A model for optimizing cycling performance by varying power on hills and in wind. *Med Sci Sports Exerc*. 1997;29(8):1104-1108.
14. Abbiss CR, Straker L, Quod MJ, Martin DT, Laursen PB. Examining pacing profiles in elite female road cyclists using exposure variation analysis. *Br J Sports Med*. 2010;44(6):437-442.
15. Peiffer JJ, Abbiss CR. Influence of environmental temperature on 40 km cycling time-trial performance. *Int J Sports Physiol Perform*. 2011;6:208-220.

"The Influence of Pleasure and Attentional Focus on Performance and Pacing Strategies in Elite Individual Time Trials"
by Ouvrard T, Gros Lambert A, Grappe F
International Journal of Sports Physiology and Performance
© 2018 Human Kinetics, Inc.

16. St Clair Gibson A, Lambert EV, Rauch LH, et al. The role of information processing between the brain and peripheral physiological systems in pacing and perception of effort. *Sports Med.* 2006;36(8):705-722.
17. Tucker R, Bester A, Lambert EV, Noakes TD, Vaughan CL, St Clair Gibson A. Non-random fluctuations in power output during self-paced exercise. *Br J Sports Med.* 2006;40(11):912-917; discussion 917.
18. Marcora SM, Staiano W. The limit to exercise tolerance in humans: mind over muscle? *Eur J Appl Physiol.* 2010;109(4):763-770.
19. Tucker R. The anticipatory regulation of performance: the physiological basis for pacing strategies and the development of a perception-based model for exercise performance. *Br J Sports Med.* 2009;43(6):392-400.
20. Noakes TD. Fatigue is a brain-derived emotion that regulates the exercise behavior to ensure the protection of whole body homeostasis. *Front Physiol.* 2012;3:82.
21. 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):511-517.
22. Baron B, Guilloux B, Begue M, Uriac S. Emotional responses during repeated sprint intervals performed on level, downhill and uphill surfaces. *J Sports Sci.* 2015;33(5):476-486.
23. Brick NE, MacIntyre TE, Campbell MJ. Thinking and Action: A Cognitive Perspective on Self-Regulation during Endurance Performance. *Front Physiol.* 2016;7:159.
24. Stevinson CD, Biddle SJ. Cognitive orientations in marathon running and "hitting the wall". *Br J Sports Med.* 1998;32(3):229-234.
25. Corbett J, Barwood MJ, Ouzounoglou A, Thelwell R, Dicks M. Influence of competition on performance and pacing during cycling exercise. *Med Sci Sports Exerc.* 2012;44(3):509-515.
26. Williams EL, Jones HS, Sparks SA, Marchant DC, Midgley AW, Mc Naughton LR. Competitor presence reduces internal attentional focus and improves 16.1 km cycling time trial performance. *J Sci Med Sport.* 2015;18(4):486-491.
27. Coutts AJ. Challenges in Developing Evidence-Based Practice in High-Performance Sport. *Int J Sports Physiol Perf.* 2017;12(6):717-718.
28. Pinot J, Grappe F. The record power profile to assess performance in elite cyclists. *Int J Sports Med.* 2011;32(11):839-844.
29. Pinot J, Grappe F. A six-year monitoring case study of a top-10 cycling Grand Tour finisher. *J Sports Sci.* 2015;33(9):907-914.
30. Heil DP. Body mass scaling of frontal area in competitive cyclists not using aero-handlebars. *Eur J Appl Physiol.* 2002;87(6):520-528.

“The Influence of Pleasure and Attentional Focus on Performance and Pacing Strategies in Elite Individual Time Trials”

by Ouvrard T, Gros Lambert A, Grappe F

International Journal of Sports Physiology and Performance

© 2018 Human Kinetics, Inc.

31. Dorel S, Hautier CA, Rambaud O, et al. Torque and power-velocity relationships in cycling: relevance to track sprint performance in world-class cyclists. *Int J Sports Med*. 2005;26(9):739-746.
32. Borg G, Ljunggren G, Ceci R. The increase of perceived exertion, aches and pain in the legs, heart rate and blood lactate during exercise on a bicycle ergometer. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 1985;54(4):343-349.
33. Brick NE, MacIntyre TE, Campbell MJ. Attentional focus in endurance activity: new paradigms and future directions. *Int Rev Sport Exerc Psychol*. 2014;7(1):106-134.
34. Bertollo M, Selenia DF, Lamberti V, Ripari P, Machado V. To focus or not to focus: Is attention on the core components of action beneficial for cycling performance? *Sport Psychol*. 2015;29(2):110-119.
35. Brick NE, Campbell MJ, Metcalfe RS, Mair JL, Macintyre TE. Altering Pace Control and Pace Regulation: Attentional Focus Effects during Running. *Med Sci Sports Exerc*. 2016;48(5):879-886.
36. Mujika I, Padilla S. Physiological and performance characteristics of male professional road cyclists. *Sports Med*. 2001;31(7):479-487.

“The Influence of Pleasure and Attentional Focus on Performance and Pacing Strategies in Elite Individual Time Trials”
by Ouvrard T, Gros Lambert A, Grappe F
International Journal of Sports Physiology and Performance
© 2018 Human Kinetics, Inc.

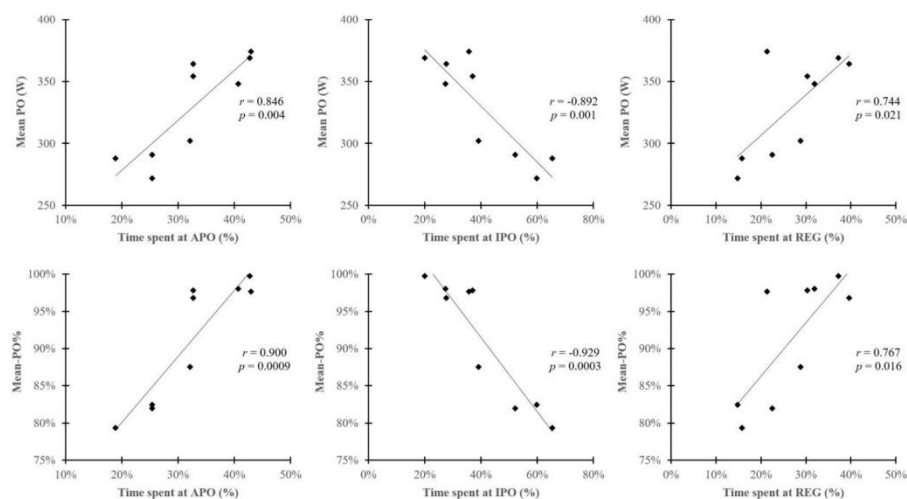


Figure 1: Relationships between Exposure Variation Analysis parameters (time spent at adapted power output for optimal constant pacing strategy, APO, prolonged efforts at inaccurate power output regarding optimal constant pacing strategy, IPO, and short-time regulations to avoid prolonged effort at inaccurate power output, REG) and time-trial mean power output expressed in watts (Mean PO, W) or in percentage of cyclists sixty-minutes Power Profile Record (Mean-PO%).

“The Influence of Pleasure and Attentional Focus on Performance and Pacing Strategies in Elite Individual Time Trials”
by Ouvrard T, Gros Lambert A, Grappe F
International Journal of Sports Physiology and Performance
© 2018 Human Kinetics, Inc.

Table 1. Example of an EVA matrix data for one subject during the ITT

Time zones	Intensity zones						
	< 90 %	90 to 94 %	94 to 98 %	98 to 102 %	102 to 106 %	106 to 110 %	> 110 %
< 2 s	7,6%	6,3%	7,0%	8,9%	8,6%	8,7%	7,9%
2 to 5 s	6,6%	0,3%	0,9%	0,5%	0,8%	0,8%	6,9%
5 to 10 s	6,5%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	5,2%
10 to 30 s	5,3%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	6,8%
> 30 s	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	4,5%

“The Influence of Pleasure and Attentional Focus on Performance and Pacing Strategies in Elite Individual Time Trials”
by Ouvrard T, Gros Lambert A, Grappe F
International Journal of Sports Physiology and Performance
© 2018 Human Kinetics, Inc.

Table 2. Mean values for all the collected variables

Variables	Mean $\pm$ SD	CV	Min	Max
ITT performance (min:sec)	69:42 $\pm$ 4:41	6.7%	76:37	64:01
Final ranking	-	-	45th	1st
Mean speed (km·h ⁻¹)	42.6 $\pm$ 2.8	6.7%	38.6	46.2
ITT mean PO (W)	329 $\pm$ 40	12.2%	272	374
(expressed as % of 60-min record PO)	91.3 $\pm$ 8.3 %	9.1%	79.3 %	99.7 %
A _p (m ²)	0.398 $\pm$ 0.016	4.0%	0.374	0.432
RPE	9.2 $\pm$ 1.0	10.9%	8	10
Pleasure	4.6 $\pm$ 3.3	71.7%	0	8.5
Affective balance	4.0 $\pm$ 2.8	84.4%	0	10
Percentage of time spent from EVA analysis				
APO	32.6 $\pm$ 8.4 %	25.8%	18.9 %	42.7 %
IPO	37.0 $\pm$ 15.9 %	43.0%	16.6 %	61.8 %
REG	30.4 $\pm$ 9.4 %	30.9%	5.3 %	32.0 %
Percentage of total ITT thoughts				
Internal sensory monitoring	43.3 $\pm$ 20.0 %	46.2%	10%	70%
Outward monitoring and active self-regulation	36.7 $\pm$ 22.8 %	62.1%	5%	80%
Distraction	19.4 $\pm$ 9.5 %	49.0%	10%	40%

A_p: projected frontal area; APO: adapted power output for optimal constant pacing strategy; IPO: inaccurate power output for constant optimal pacing strategy; REG: short-time regulation of inaccurate power output

"The Influence of Pleasure and Attentional Focus on Performance and Pacing Strategies in Elite Individual Time Trials"
by Ouvrard T, Gros Lambert A, Grappe F
International Journal of Sports Physiology and Performance
© 2018 Human Kinetics, Inc.

Table 3. Pearson correlation coefficients between EVA pacing parameters and psychological variables

Variables		RPE	Pleasure	Affective balance	Percentage of total ITT thoughts		
					Int. S. M.	OM-AS	Distract.
Percentage of time from EVA analysis	APO	-0.123	0.537	-0.493	-0.553	0.827#	-0.619
	IPO	0.177	-0.746*	0.709*	0.386	-0.632	0.525
	REG	-0.189	0.774*	-0.770*	-0.155	0.323	-0.330

APO: adapted power output for optimal constant pacing strategy; IPO: inaccurate power output for constant optimal pacing strategy; REG: short-time regulation of inaccurate power output; Int. S. M.: internal sensory monitoring; OM-AS: outward monitoring and active self-regulation; Distract.: distraction.

Significant relationships: * ($p < 0.05$), # ($p < 0.01$).

CHAPITRE 4 : Influence de la répétition de montées à intensité maximale sur les mécanismes de régulation de l'effort chez des jeunes cyclistes de niveau élite

Les résultats de cette étude ont fait l'objet d'un article soumis dans la revue *European Journal of Applied Physiology* (Bouillod, Ouvrard, et Grappe, *en cours de soumission*) : « Influence of repeated uphill time trials on pacing regulation in young elite cyclists ».

Résumé détaillé :

Influence of repeated uphill time trials on pacing regulation in young elite cyclists

Bouillod A., Ouvrard T., et Grappe F.

Introduction :

La gestion de l'effort a pour objectif de contrôler la dépense énergétique de l'athlète dans le but de permettre une utilisation optimale des ressources physiologiques lors d'un exercice d'endurance (Atkinson *et coll.*, 2007b). Les cyclistes contrôlent ainsi leur intensité d'effort dans le but de réguler leur vitesse afin de réaliser la meilleure performance possible (Foster *et coll.*, 1993, Abbiss et Laursen 2008). Lors d'efforts d'endurance autorégulés, les athlètes doivent être capables d'estimer la durée d'effort restante ainsi que l'intensité d'exercice qu'ils seront capables de maintenir jusqu'à l'arrivée sans épuisement prématuré (Tucker 2009). La capacité du cycliste à choisir une intensité d'effort optimale est principalement dépendante de ses expériences antérieures ainsi que de sa capacité à interpréter correctement les informations pertinentes pour la gestion de son effort (Mauger *et coll.*, 2009). Les athlètes de niveau élite sont notamment capables de réguler leur $P_{méca}$ de multiples manières en fonction du profil du parcours et de la distance restante à parcourir dans le but de réaliser la meilleure performance possible.

La gestion de l'effort a dans un premier temps surtout été étudiée en laboratoire, sur des épreuves où il était demandé aux cyclistes de maintenir le plus haute $P_{méca}$ possible sur une

durée donnée (Aisbett *et coll.*, 2009a, Aisbett *et coll.*, 2009b). De la même manière, les programmes d'entraînement spécifiques pour les disciplines d'endurance, et en particulier les exercices de type interval-training, impliquent essentiellement le maintien d'intensités d'efforts spécifiques sur une durée prédéfinie (Buchheit et Laursen 2013). Or, les courses cyclistes, lors d'épreuves en ligne comme lors des CLM, sont constituées d'exercices avec une distance définie à l'avance, à parcourir le plus rapidement possible (Abbiss *et coll.*, 2016a). Ces épreuves basées sur une distance ou une durée d'effort à parcourir impliquent des mécanismes de régulation différents, notamment en ce qui concerne l'estimation de la durée d'effort restante à parcourir. En raison de ces différences, les épreuves basées sur des distances à parcourir peuvent être perçues comme plus difficiles par les athlètes (Brick *et coll.*, 2014, Abbiss *et coll.*, 2016b). En conséquence, il est important pour les études scientifiques ayant pour objectif d'analyser les mécanismes de régulation de l'effort de proposer des exercices présentant des caractéristiques similaires aux efforts réellement réalisés en compétition.

Comme évoqué précédemment, plusieurs études se sont déjà intéressées à l'effet de la pente sur la stratégie de gestion de l'effort optimale (Swain 1997, Canglely *et coll.*, 2011, Wells *et coll.*, 2013, Wells et Marwood 2016). Cependant, aucune étude, à notre connaissance, n'a encore reporté l'effet de la répétition de montée sur les mécanismes de régulation de l'effort. Or les courses cyclistes de haut-niveau, et en particulier les étapes de montagne lors des Grand Tours, présentent en général de nombreuses ascensions, qui impliquent une gestion de l'effort optimale lors de montées répétées. Le but de cette étude était d'analyser les stratégies de gestion de l'effort de jeunes cyclistes de niveau élite lors de montées répétées à intensité maximale. Nous avons émis l'hypothèse selon laquelle l'accumulation de la fatigue avec la répétition des montées provoquerait une dégradation des capacités de régulation de l'effort des cyclistes, illustrée par des variations de $P_{méca}$ plus importantes et à l'origine d'une diminution des performances lors de la dernière montée.

Méthodes :

Douze jeunes cyclistes de niveau élite ont participé à cette étude (âge : $20,9 \pm 2,3$ ans ; taille : $177,5 \pm 4,8$ cm ; poids : $65,5 \pm 5,0$ kg ; $\dot{V}O_2max$: $80,3 \pm 6,9$ ml·min⁻¹·kg⁻¹ ; PMA : 417 ± 23 W). Tous étaient membres d'une structure de formation espoir affiliée à une équipe cycliste professionnelle de niveau World-Tour, et sept d'entre eux ont aujourd'hui rejoint les rangs professionnels. Au cours d'une première session expérimentale, les participants ont réalisé un test incrémental cycliste en laboratoire dans le but de déterminer leurs $\dot{V}O_2max$ et PMA. Lors

d'une seconde session, les participants ont réalisé trois montées CLM sur le même parcours de 2,7 km à $7,4 \pm 1,2$ %. Pour l'ensemble des montées, les participants avaient pour consigne de réguler leur effort afin de réaliser le meilleur temps possible sur le cumul des trois montées. Entre chaque montée, les cyclistes disposaient de 30 minutes de récupération active. Les participants ont réalisé l'ensemble des montées sur leur vélo personnel équipé d'un capteur de $P_{méca}$ SRM, et équipé d'un analyseur de gaz Metamax 3B-R2 dans le but de mesurer leur $\dot{V}O_2$, leur rejet de dioxyde de carbone ($\dot{V}CO_2$), leur quotient respiratoire (QR), ainsi que leur fréquence cardiaque. Les données brutes de $P_{méca}$ développée ont été analysées à l'aide de la méthode EVA telle que précédemment présentée, afin de quantifier pour chaque montée les temps passés à APO, IPO et REG. La RPE des athlètes était également recueillie à la suite de chaque montée.

Les effets de la montée (montée 1, 2 ou 3) et du temps (par tranche de 10 % de temps total de la montée) sur la $P_{méca}$ développée, la cadence de pédalage, $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$, QR et la fréquence cardiaque ont été analysés à l'aide d'ANOVA à mesures répétées à deux facteurs (montée x temps). Les évolutions de performance (temps pour parcourir la montée) et de temps passés à APO, IPO et REG en fonction des montées ont été analysées à l'aide d'ANOVA à mesures répétées à un facteur (montée).

Résultats :

La performance ne variait pas significativement entre les trois montées (7 min 48 s $\pm$ 24 s, 7 min 52 s $\pm$ 28 s, 7 min 51 s $\pm$ 24 s, pour les montées 1, 2 et 3 respectivement). La $P_{méca}$ moyenne développée était également similaire pour les trois montées (respectivement 409 ± 32 W, 406 ± 29 W et 407 ± 29 W), avec aucune différence significative entre les montées pour la $P_{méca}$ développée entre le départ et 90 % de la durée de chaque CLM. En revanche, la $P_{méca}$ était significativement plus élevée dans les derniers 10 % de la troisième montée en comparaison avec la première (+14,1 % ; $p < 0,001$) et la deuxième montée (+9,7 % ; $p < 0,001$; **Figure 27**).

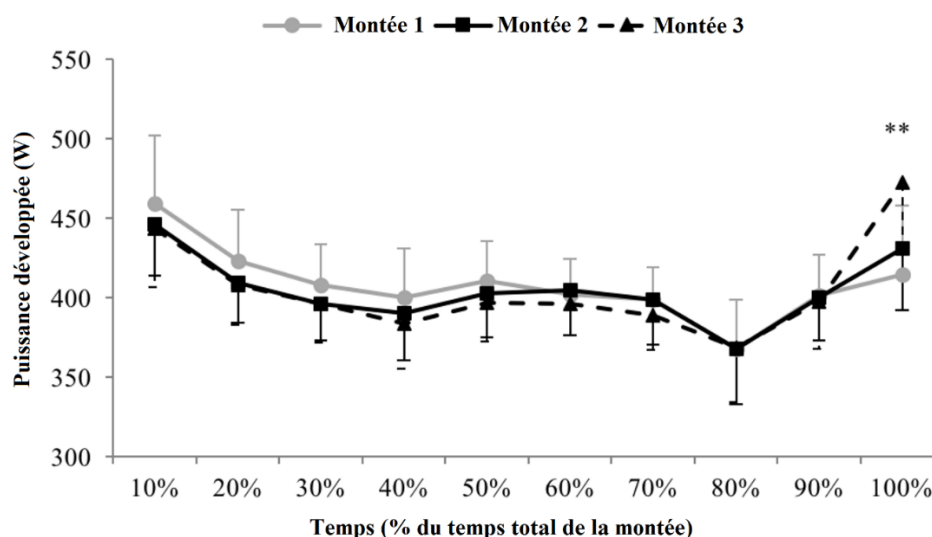


Figure 27. Evolution de la $P_{méca}$ développée au cours des montées 1, 2 et 3 (**, différence significative entre montée 3 et montée 1 et 2, $p < 0,001$).

Aucune différence significative n'était observable entre les montées concernant le temps passé à APO ou REG. Seul le temps passé à IPO était significativement plus élevé pour la montée 3 ($10 \pm 7\%$) en comparaison avec la montée 1 ($4 \pm 6\%$; **Figure 28**), principalement en raison du end-spurt observable dans les derniers 10 % de la montée 3.

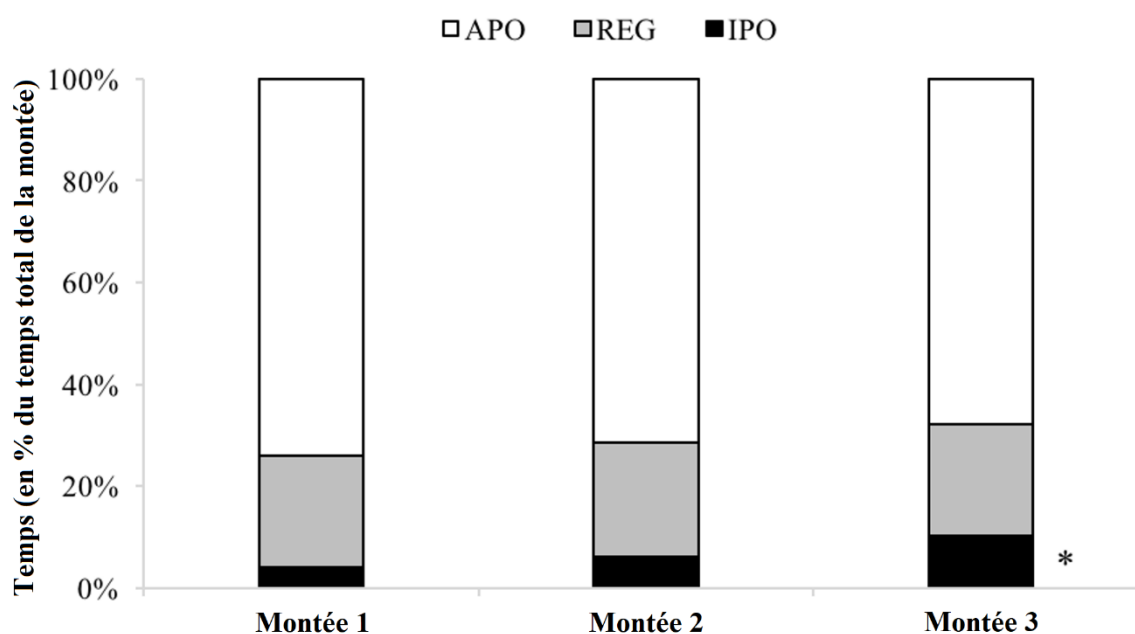


Figure 28. Evolution des temps passés à APO, IPO et REG entre les montées 1, 2 et 3 (*, temps passé à IPO significativement différent par rapport à la montée 1 ; $p < 0,05$).

Concernant les variables physiologiques, si $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$, QR et la fréquence cardiaque augmentent significativement au sein d'une même montée ($p < 0,05$), la fréquence cardiaque et $\dot{V}O_2$ ne varient pas significativement entre les montées. Seuls RPE, $\dot{V}CO_2$ et QR augmentent significativement entre la montée 1 et les montées 2 et 3 ($p < 0,05$).

Discussion :

Les résultats de cette étude montrent que des jeunes cyclistes de niveau élite sont capables de répéter la même stratégie de régulation de l'effort au cours de trois montées répétées à intensité maximale dans le but de réaliser la meilleure performance possible. En effet, le pourcentage de temps passé à APO et la $P_{méca}$ moyenne demeurent remarquablement stables et élevés lors des trois montées consécutives, avec aucune différence significative entre les montées pour les premiers 90 % de chaque effort. Ces résultats suggèrent que l'intensité d'effort est très bien régulée de manière centrale chez des cyclistes de niveau élite, sur la base de l'estimation de la durée d'effort restante à parcourir (Noakes *et coll.*, 2005, Tucker 2009, Noakes 2011, 2012, Pageaux 2014, St Clair Gibson *et coll.*, 2018). Le cerveau sélectionnerait de manière très efficace l'intensité d'effort que les athlètes seraient capables de maintenir sur les trois montées consécutives, leur permettant de parfaitement réguler leur effort et de réaliser une performance physique de très haut niveau (avec notamment des $P_{méca}$ et $\dot{V}O_2$ moyennes de $6,2 \pm 0,4 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ et $75,0 \pm 6,3 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ respectivement, pour une durée d'effort totale de $23 \text{ min } 30 \text{ s} \pm 1 \text{ min } 13 \text{ s}$). Cette étude est ainsi la première à mettre en évidence cette remarquable précision des cyclistes de niveau élite pour réguler l'effort lors de montées répétées.

Telle que déjà observée dans de nombreuses études, cette $P_{méca}$ augmente significativement uniquement dans les derniers 10 % de la dernière montée, pour le end-spurt. Cependant, le end-spurt dans cette étude reste d'amplitude et de durée relativement faible au regard de la durée totale d'effort (+14,1 % sur $47 \text{ s} \pm 2 \text{ s}$ pour une durée d'effort totale de $23 \text{ min } 30 \text{ s} \pm 1 \text{ min } 13 \text{ s}$), comparé aux précédentes études avec des athlètes de niveau plus hétérogène (Micklewright *et coll.*, 2010, Thomas *et coll.*, 2012). Le haut niveau de sollicitation physiologique maintenu tout au long des trois montées ($\dot{V}O_2$ et QR moyens de $94 \pm 5 \%$ de $\dot{V}O_{2\text{max}}$ et $1,01 \pm 0,04$; respectivement) suggère que la stratégie de gestion de l'effort optimale utilisée par les athlètes de haut-niveau ayant participé à cette étude leur a permis d'atteindre l'arrivée de la dernière montée dans un état très proche de leurs limites physiologiques. En conséquence, cela pourrait expliquer pourquoi ils ne furent capable d'augmenter que très légèrement la $P_{méca}$ développée pour ce end-spurt, principalement en raison d'une motivation plus importante à l'approche de

l'arrivée, tel que déjà démontré par Marcora et Staiano (Marcora et Staiano 2010a). Même si davantage de travaux avec des techniques plus poussées permettant de quantifier l'utilisation des réserves énergétiques sont nécessaires afin de confirmer ces hypothèses, ces résultats suggèrent malgré tout que les capacités remarquables de régulation de l'effort des athlètes de haut-niveau leur permettent d'avoir une utilisation plus importante de leur potentiel physique pendant l'effort, les amenant ainsi à atteindre l'arrivée avec un niveau seulement réduit de réserves physiologiques encore disponibles.

Les cyclistes de haut-niveau possèderaient ainsi un modèle mental très efficace leur permettant de réguler au mieux leur effort lors de montées répétées. Comme supposé par certains modèles psychophysiologiques (Tucker 2009, St Clair Gibson *et coll.*, 2018), cette régulation optimale de l'intensité d'exercice se ferait principalement à partir de la perception de l'effort. En effet, même si la RPE était élevée dès la fin de la première montée ($8,0 \pm 1,1$ sur l'échelle CR-10 de Borg), elle a continué à augmenter pour la deuxième ($8,1 \pm 1,0$) et la troisième montée ($9,0 \pm 0,9$; valeur significativement différente de la montée 1 et 2 ; $p < 0,05$). Ces résultats confirment que la régulation de l'effort serait principalement contrôlée à partir de la perception de l'effort, l'athlète choisissant une intensité d'effort permettant une vitesse d'augmentation optimale de la RPE avec des niveaux maximaux atteints seulement au moment de franchir la ligne d'arrivée.

Conclusion et perspectives :

Cette étude est la première à avoir analysé l'effet de montées répétées à intensité maximale, telles que rencontrées lors des étapes de montagne des courses cyclistes de haut-niveau, sur mécanismes de régulation de l'effort. Les résultats de cette étude montrent que des cyclistes de niveau élite, même jeunes, possèdent des capacités de régulation de l'effort remarquables, leur permettant de gérer leur effort de manière optimale, afin de développer une $P_{méca}$ moyenne très élevée et constante lors de trois montées successives. Il serait intéressant pour les études futures de déterminer si ces capacités de régulation de l'effort très développées sont déterminées génétiquement ou acquises par les cyclistes de haut-niveau après de nombreuses heures d'entraînement impliquant une multitude d'efforts répétés de durées variables.

1 **Influence of repeated uphill time trials on pacing regulation in young elite cyclists**

2

3 Anthony BOUILLOD^{1,2,3}, Theo OUVRARD¹ & Frederic GRAPPE^{1,4}

4

5 **Affiliations:**

6 ¹ Univ. Bourgogne Franche-Comté, C3S, Sport Performance Dpt, EA4660, Besançon, France

7 ² French Cycling Federation, Saint Quentin en Yvelines, France

8 ³ LAAS-CNRS, Université de Toulouse, CNRS, Toulouse, France

9 ⁴ Professional Cycling Team FDJ, Moussy le Vieux, France

10

11 **Corresponding author:**

12 *Theo Ouvrard*

13 Orcid ID: 0000-0002-9075-7968

14 University of Franche-Comte

15 Culture – Sport – Health – Society (C3S), Sport-Performance Department

16 UPFR Sports

17 31 chemin de l'építaphe

18 25000 Besançon

19 France

20 Tel.: +33/633/503 850

21 Fax: +33/384/537 838

22 ouvrard.to@gmail.com

1 **Abstract**

2

3 High-level cycling races, and more especially mountain stages, involve several climbs which
4 imply specific optimal pacing strategies during repeated efforts. **Purpose:** The aim of this
5 study was to analyse pacing strategies and performance during repeated uphill time trials (TT)
6 in young elite cyclists. **Methods:** Twelve elite cyclists completed two testing sessions
7 including: 1) an incremental-specific cycling test on a cycle ergometer; and 2) three
8 consecutive field distance-based uphill TTs (2.8 km at $7.0 \pm 1.2\%$). **Results:** The mean PO
9 was very close between the three uphill TTs (409 ± 32 W, 406 ± 29 W and 407 ± 29 W for the
10 TT1, TT2 and TT3, respectively) with no significant difference in pacing strategies and
11 exercise intensity regulation, except for the end-spurt occurring in the final 10% of TT3
12 (+14.1% and +9.7% in comparison with TT1 and TT2, respectively). Physiological variables
13 (mean VO_2 and HR) also remained stable amongst TTs. **Conclusions:** Elite cyclists are able
14 to perform similar mean PO in three consecutive uphill TTs thanks to noteworthy pacing
15 capacities. If these very accurate pacing strategies allow elite cyclists to sustain very high
16 level of physiological strain, physiological variables remained stable over the TTs,
17 demonstrating that performance wasn't limited by any disturbance of physiological
18 homeostasis. These results suggest that pacing capacities of elite cyclists are one of their main
19 characteristics which allow them to sustain very high exercise intensity during repeated
20 climbs, as observed in professional mountain stages.

21

22 **Keywords**

23

24 *Power Output, Pacing strategy, Exposure variation analysis, Field performance, Elite*
25 *Cyclists.*

26

1 **Abbreviations:**

2

Accurate power output for the optimal constant pacing strategy	APO
Analysis of Variance	ANOVA
Borg's category-ratio scale	CR-10
Carbon dioxide	CO ₂
Carbon dioxide consumption	VCO ₂
Exposure Variation Analysis	EVA
Heart rate	HR
Inaccurate power output for the optimal constant pacing strategy	IPO
Maximal aerobic power	MAP
Maximal oxygen consumption	VO _{2max}
Oxygen	O ₂
Oxygen consumption	VO ₂
Power output	PO
Rate of perceived exertion	RPE
Respiratory exchange ratio	RER
Schoberer Rad Messtechnik	SRM
Short-time regulation of inaccurate power output	REG
Time trial	TT

3

1 **INTRODUCTION**

2

3 Pacing strategy is related to the energy expenditure of an athlete and is described as the
4 optimal allocation of physiological resources for an endurance event (Atkinson et al. 2007).
5 By regulating the rate of energy expenditure, athletes can vary their speed over a race
6 (Hettinga et al. 2006) with the aim to achieve an optimal performance (Abbiss and Laursen
7 2008; Foster et al. 1993). During self-paced endurance events, athletes must accurately judge
8 the remaining effort duration and the exercise intensity they will be able to sustain in order to
9 avoid exhaustion before the finish (Tucker 2009). The ability to choose an optimal pacing
10 strategy is mainly dependent on an athlete's previous experience and his ability to use
11 appropriate feedback (Mauger et al. 2009); thus high-performance athletes can vary their
12 power output (PO) in different ways depending on the race distance and terrain.

13

14 Pacing strategy has primarily been studied in the laboratory by maintaining the highest
15 possible intensity for a given amount of time (time-based trial) (Aisbett et al. 2009a; Aisbett
16 et al. 2009b). Additionally, training planning in endurance sports, and particularly with regard
17 to high-intensity interval training, typically involves the prescription of time-based
18 performance tasks (Buchheit and Laursen 2013). However, competitions in endurance sports
19 are mainly based on a known-distance that is completed in the shortest possible time
20 (distance-based trial) (Abbiss et al. 2016). Distance- and time-based trials are different, and it
21 has been suggested that such dissimilarities may influence key features of the regulation
22 mechanisms, such as the athlete's ability to judge the remaining exercise duration. Due to
23 these differences, distance-based endurance tasks may be perceived as more challenging and
24 more difficult than time-based tasks (Abbiss et al. 2016; Brick et al. 2014). Considering these
25 differences, it is important to analyse the pacing strategy during an effort that is similar to the
26 specificity of the discipline.

27

28 Tucker et al. reported that PO recordings during self-paced individual time trials (TTs) exhibit
29 non-random fluctuations, which can be determinant for the intensity regulation by the central
30 nervous system (Tucker et al. 2006). These short-time intensity fluctuations illustrate an
31 important behavioural response to homeostatic challenges, which allow the athletes to reduce
32 physiological strain during submaximal exercise (Lander et al. 2009). Recently, Abbiss et al.
33 proposed the "Exposure Variation Analysis" (EVA) method to analyse PO variations
34 observed during races (Abbiss et al. 2010). This new method can be used to study the

1 exchange of information occurring continuously in the brain at the origin of the PO
2 production during a TT (Ouvrard et al. 2018a; Ouvrard et al. 2018b). Based on quantification
3 of each effort performed at a constant intensity, the EVA method allows for analysis of
4 several phases of certainty and uncertainty, which are induced alternatively in the brain due to
5 the time lag between transmission of the motor signal and integration of feedback information
6 returning from the associated muscular contractions (St Clair Gibson et al. 2006; St Clair
7 Gibson et al. 2018). Thus, in terms of the overall control of exercise intensity, this method can
8 be used to determine if PO corrections induced by the brain are relevant for the overall
9 optimal pacing strategy (Ouvrard et al. 2018a; Ouvrard et al. 2018b; St Clair Gibson et al.
10 2006; St Clair Gibson et al. 2018).

11
12 Several studies have analysed the impact of road gradient on optimal pacing strategy (Swain
13 1997). Conversely, to the best of our knowledge, no study has yet reported the effect of
14 repeating uphill TTs on pacing strategy. High-level cycling races, and in particular mountain
15 stages, involve several climbs, which imply optimal pacing strategies during repeated efforts.
16 Therefore, the aim of this study was to analyse pacing regulation during repeated uphill TTs
17 in young elite cyclists. We hypothesized that the accumulating fatigue involved in repeated
18 maximal efforts should induce degradation of pacing regulation, as illustrated by greater PO
19 variations, decreased TT time and decreased mean PO. Further, use of the EVA method
20 should provide an in-depth analysis of the PO fluctuations.

21

22 **METHODS**

23

24 **Participants**

25 Twelve young elite cyclists volunteered to participate in the study. All subjects were members
26 of the affiliate under-23 development structure of a World-Tour team, and seven of them have
27 become professional since the experiment. Their mean $\pm$ standard deviation values for age,
28 height, body mass, maximal oxygen consumption ($\text{VO}_{2\text{max}}$) and maximal aerobic power
29 (MAP) were 20.9 ± 2.3 years, 177.5 ± 4.8 cm, 65.5 ± 5.0 kg, 80.3 ± 6.9 ml·min⁻¹·kg⁻¹ and 417
30 ± 23 W, respectively. The riders followed a regular training regimen and participated in races
31 throughout the season.

32

1 **Procedures**

2 During the first session, the cyclists performed an incremental specific cycling test on a cycle
3 ergometer. In the second session, the cyclists performed a field test including three
4 distance-based uphill TTs with their personal road bicycle. The two sessions were conducted
5 on two consecutive days. Subjects were asked to maintain their normal training the day before
6 the first session.

7

8 *Incremental specific cycling test*

9 MAP was determined from an incremental specific cycling test on an SRM Indoor Trainer
10 (SRM, Schoberer Rad Messtechnik, Jülich, Germany) equipped with clip-in pedals. To
11 ensure accurate measures, a static calibration was applied before the study (Wooles et al.
12 2005), and the zero-offset frequency was adjusted according to the manufacturer's
13 instructions. The workload was initially set at 100 W and was then increased incrementally by
14 30 W at 2-minute intervals. Subjects were allowed to freely select their cadence for each step.
15 The test was performed until exhaustion, which consisted of both the rate of perceived
16 exertion (RPE), as determined by the Borg's category-ratio scale (CR-10) (Borg et al. 1985),
17 being between 9 and 10 and a significant decrease in pedalling cadence. The MAP was
18 determined as follows: when the final PO level was maintained over the duration (2 min), the
19 MAP corresponded to the mean of this PO level. However, if the athlete could not sustain the
20 required effort over the duration of the level, the MAP was calculated as follows (Bouillod et
21 al. 2017):

22

23
$$\text{MAP} = \text{PO}_{\text{lower level}} + (\text{PO}_{\text{final level}} - \text{PO}_{\text{lower level}}) \times (\text{Time}_{\text{final level}} / 120)$$

24

25 where $\text{PO}_{\text{lower level}}$ is the value of the last complete workload (W), $\text{PO}_{\text{final level}}$ is the value of the
26 last incomplete workload (W), and $\text{Time}_{\text{final level}}$ (s) is the time that the last incomplete
27 workload was maintained.

28

29 $\text{VO}_{2\text{max}}$ was determined from metabolic measurements, which were measured with a
30 breath-by-breath portable gas analyser (Metamax 3B-R2, Cortex Biophysik GmbH, Leipzig,
31 Germany) (Macfarlane and Wong 2012; Vogler et al. 2010). The Metamax 3B-R2 measured
32 gas exchange using a bidirectional digital turbine. A 60-cm length of Permapure sampling
33 tube was attached to the turbine to enable analysis of the oxygen (O_2) and carbon dioxide
34 (CO_2) concentrations using an electrochemical cell and an infrared analyser, respectively. O_2

1 consumption (VO_2) and CO_2 production (VCO_2) were calculated using standard metabolic
2 algorithms. All data were immediately transmitted via Bluetooth telemetry to a computer
3 using MetaSoft® studio software (Cortex Biophysik GmbH, Leipzig, Germany). Prior to being
4 used, the system was turned on for at least 30 min and was then calibrated prior to every test
5 according to the manufacturer's recommendations. This involved first calibrating the gas by
6 using a reference gas (15% O_2 and 5% CO_2), and then verifying the calibration against the
7 ambient air. Second, a volume calibration was performed using a standardized 3 L syringe
8 (5530 series, Hans Rudolph, Inc., MO, USA).

9

10 *Uphill Time Trials*

11 The subjects performed three TTs on the same 2.8 km uphill course (Figure 1, mean slope of
12 $7.0 \pm 1.2\%$) and were instructed to complete the TTs with a self-selected pacing strategy to
13 achieve the shortest total time (i.e., the sum of the durations of the three TTs was to be as low
14 as possible). No feedback regarding instantaneous PO was given during the TTs. Each climb
15 was separated by 30 min of active recovery, which involved the cyclists to ride down the hill
16 and spin easily prior to the next TT. Prior to the first TT test, the subjects performed the climb
17 at a submaximal intensity to become accustomed to the TT course. The Metamax 3B-R2 was
18 installed on the cyclists 5 min before the start and was removed at the end of each TT. Each
19 bicycle was fitted with a SRM crankset (SRM, Schoberer Rad Messtechnik, Jülich,
20 Germany) which was calibrated according to the method previously described and paired with
21 a Garmin power control (Garmin 810, Olathe, USA) to record PO during the test. The
22 following variables were measured by the Metamax 3B-R2 during the three uphill TTs: VO_2 ,
23 VCO_2 , respiratory exchange ratio (RER) and heart rate (HR). The cyclists were followed by a
24 car (located at least 100 m behind), which contained a computer that recorded the metabolic
25 data. Finally, RPE was measured by the CR-10 at the end of each TT.

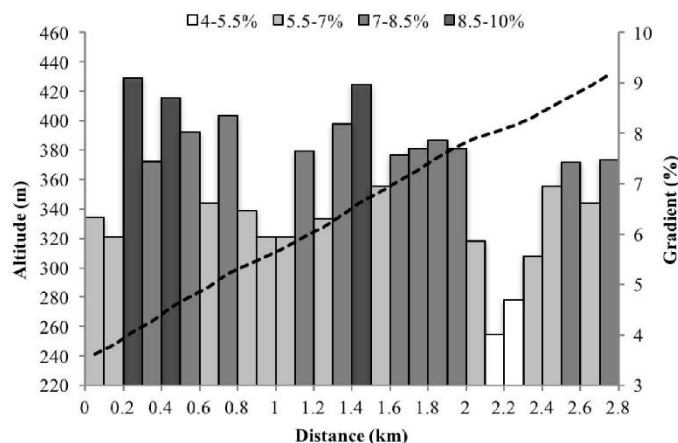


Figure 1. Uphill time trial course altimetry (dashed line) and gradient (bars)

Data analysis

The SRM data were analysed with TrainingPeaks software (WKO4, Peakware, Boulder, USA). To further investigate exercise intensity regulation, PO data were analysed using the EVA that was computed using a customized excel spreadsheet. The EVA quantifies PO fluctuations' time and amplitude as an expression of the total TT time. In accordance with previous studies (Abbiss and Laursen 2008; Peiffer and Abbiss 2011), EVA quantified 1) the percentage of the total TT time that was spent within seven levels of the exercise intensity defined from the TT mean PO (<90%; 90 to 94%; 94 to 98%; 98 to 102%; 102 to 106%; 106 to 110%; >110%) and 2) the "acute" time for which PO was maintained within each predefined level of exercise intensity without changing to another power band. To facilitate exercise intensity regulation interpretations, time spent inside the different zones was summed based on three types of effort regulation used by the cyclist (Ouvrard et al. 2018a; Ouvrard et al. 2018b): 1) accurate PO for the optimal constant pacing strategy (APO; PO values between 90% and 110% of mean PO), 2) inaccurate PO for the optimal constant pacing strategy (IPO; PO <90% or >110% of the mean PO for more than 10 s continuously) and 3) short-time regulation of inaccurate PO (REG; PO <90% or >110% of the mean PO for less than 10 s continuously). Thus, in accordance with the hypothesis of St Clair Gibson et al., the more time the athlete spent at the APO and REG, the more he is able to correctly interpret feedback from physiological systems in order to maintain an optimal PO for the overall pacing strategy and to quickly correct the motor signals sent to the muscles for every inaccurate effort at a too low or too high intensity (St Clair Gibson et al. 2006; St Clair Gibson et al. 2018).

1 Conversely, the more time the athlete spends at IPO, the longer exercise intensity control is
2 inadequate, with inaccurate PO levels remaining uncorrected over prolonged periods of time.

3

4 **Statistical analysis**

5 Descriptive statistics were computed, and all data were expressed as the mean $\pm$ standard
6 deviation. Statistical analyses were performed using SigmaPlot 12.0 software (Systat Inc. San
7 Jose, USA). The Kolmogorov-Smirnov-Lilliefors test was used to verify the Gaussian
8 distribution of all results and showed that the data were normally distributed. The effects of
9 both uphill TT and time on PO, cadence, VO_2 , VCO_2 , RER and HR were tested using a
10 two-way repeated measures Analysis of Variance (ANOVA). When a significant effect was
11 detected, a post-hoc comparison was made using the Holm-Sidak test. Additionally, the
12 evolution of RPE, APO, IPO and REG over the three uphill TTs was tested with a one-way
13 repeated measures ANOVA. The level of statistical significance was set at $p < 0.05$.

14

15 **RESULTS**

16

17 TT time did not differ significantly between the three uphill TTs (7 min 48 s $\pm$ 24 s, 7 min 52
18 s $\pm$ 28 s, 7 min 51 s $\pm$ 24 s for TT1, TT2 and TT3 respectively). Mean PO was also similar
19 between the three uphill TTs (409 $\pm$ 32 W, 406 $\pm$ 29 W and 407 $\pm$ 29 W respectively), with no
20 significant difference from the start to the 90% time splits of TTs. However, a significant
21 interaction was observed at the end of the exercise, with a higher PO ($p < 0.001$) in TT3 during
22 the 100% time split when compared with TT2 (+9.7%) and TT1 (+14.1%) (Figure 2).

23

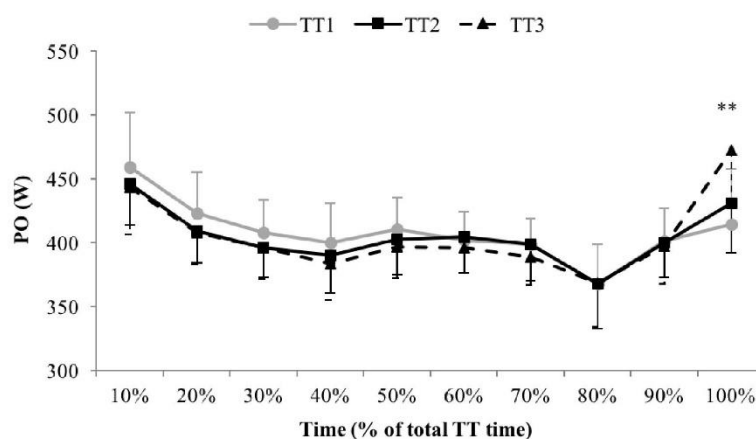


Figure 2. Evolution of power output (PO) over time during each uphill time trial (TT).

** Significant difference between TT3 and both TT1 and TT2.

No significant difference between TTs was observed for time spent at APO ($74 \pm 13\%$, $71 \pm 11\%$ and $68 \pm 13\%$ respectively) and REG ($22 \pm 10\%$, $22 \pm 9\%$ and $22 \pm 9\%$ respectively). Only the time spent at IPO was significantly increased from $4 \pm 6\%$ to $10 \pm 7\%$ between TT1 and TT3 (Figure 3), with $56 \pm 31\%$ of this increase occurring in the final 10% of TT3.

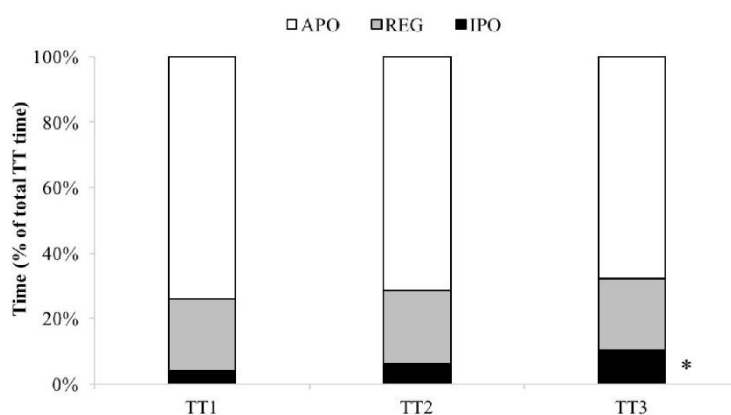


Figure 3. Percentage of total time trial (TT) time spent at accurate power output (APO), with short-time regulations of inaccurate power output (REG) and at inaccurate power output (IPO) during the three uphill TTs.

* Significant difference with TT1 ($p < 0.05$)

1
2 Table 1 describes the other variables measured during the three uphill TTs. There was a
3 significant effect of uphill TT number on cadence, VCO₂, RER and RPE, whereas VO₂ and
4 HR were not changed between the three TTs.

5
Table 1. Comparative statistics of cadence, VO₂, HR, VCO₂, RER and RPE between the three consecutive time trials (TT) realised under similar conditions.

<i>Variable</i>	<i>TT1</i>	<i>TT2</i>	<i>TT3</i>
Cadence (rpm)	88.1 ± 3.8	86.8 ± 4.9*	85.5 ± 4.6**
VO ₂ (ml·min ⁻¹ ·kg ⁻¹)	73.7 ± 6.3	72.6 ± 6.7	71.7 ± 6.9
HR (bpm)	178.3 ± 6.4	178.6 ± 7.1	178.1 ± 6.9
VCO ₂ (l·min ⁻¹)	4.9 ± 0.4	4.8 ± 0.4*	4.7 ± 0.4**
RER	1.02 ± 0.06	1.00 ± 0.05*	1.00 ± 0.06*
RPE	8.0 ± 1.1	8.1 ± 1.0	9.0 ± 0.9#

VO₂, Oxygen consumption; HR, Heart rate; VCO₂, Carbon dioxide production;

RER, Respiratory exchange ratio; RPE, Rate of perceived exertion.

Significant difference compared to TT1 at p<0.05* and at p<0.001**

Significant difference compared to TT1 and TT2 at p<0.05#

6
7 The evolution of the different physiological variables recorded during the TTs are detailed in
8 Table 2. For all TTs, the mean VO₂, VCO₂ and RER were significantly increased by 25.2%
9 (14.3 ml·min⁻¹·kg⁻¹), 38.9% (1.3 l·min⁻¹) and 10.9% (0.10), respectively, between the 10%
10 and 20% time splits and then stabilized between 20 and 100% of the TTs (an example for
11 VO₂ is provided in Figure 4). Finally, the mean HR continuously increased by 17% (27 bpm)
12 over the duration of the test.

Table 2. Comparative statistics of cadence, VO_2 , HR and VCO_2 between the different times of all uphill TTs. The two-way repeated measures ANOVA shows a significant main effect of time for all variables.

Variable	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Cadence (rpm)	85 ± 7 ^a	84 ± 3 ^a	87 ± 3	89 ± 4	89 ± 4	87 ± 2	85 ± 2	88 ± 3	89 ± 4	85 ± 4 ^a
CV (%)	8.6%	3.2%	3.0%	3.9%	4.6%	2.1%	2.8%	3.0%	4.6%	4.5%
VO_2 (ml·min ⁻¹ ·kg ⁻¹)	56.8 ± 6.2 ^b	71.2 ± 6.4	74.1 ± 6.1	74.2 ± 5.6	74.6 ± 5.7	75.4 ± 6.1	75.5 ± 6.7	75.2 ± 7.0	74.1 ± 6.9	75.4 ± 7.2
CV (%)	10.9%	9.0%	8.3%	7.6%	7.7%	8.0%	8.9%	9.3%	9.3%	9.5%
HR (bpm)	159 ± 8 ^b	172 ± 7 ^c	176 ± 6 ^d	178 ± 6 ^c	180 ± 6 ^f	182 ± 6	183 ± 6	184 ± 6	184 ± 7	186 ± 7
CV (%)	5.0%	4.0%	3.5%	3.3%	3.3%	3.3%	3.4%	3.4%	3.6%	3.8%
VCO_2 (l·min ⁻¹)	3.4 ± 0.3 ^b	4.7 ± 0.4 ^g	5.0 ± 0.3	5.0 ± 0.4	5.0 ± 0.4	5.0 ± 0.4	5.0 ± 0.4	5.0 ± 0.4	4.9 ± 0.4	5.0 ± 0.4
CV (%)	9.9%	7.7%	7.0%	8.1%	8.5%	8.2%	7.5%	7.7%	7.6%	7.4%
RER	0.91 ± 0.05 ^b	1.01 ± 0.05	1.04 ± 0.06	1.03 ± 0.06	1.02 ± 0.06	1.02 ± 0.06	1.02 ± 0.06	1.02 ± 0.05	1.01 ± 0.05	1.02 ± 0.05
CV (%)	4.9%	5.0%	5.3%	5.8%	6.0%	5.9%	5.6%	5.2%	5.3%	5.1%

VO_2 , Oxygen consumption; HR, Heart rate; VCO_2 , Carbon dioxide production; RER, Respiratory exchange ratio.

^a Significant difference with 40-50-90%

^b Significant difference with all times

^c Significant difference with all times excepted 30%

^d Significant difference with 10-60-70-80-90-100%

^e Significant difference with 10-20-70-80-90-100%

^f Significant difference with 10-20-100%

^g Significant difference with 10-60-70%

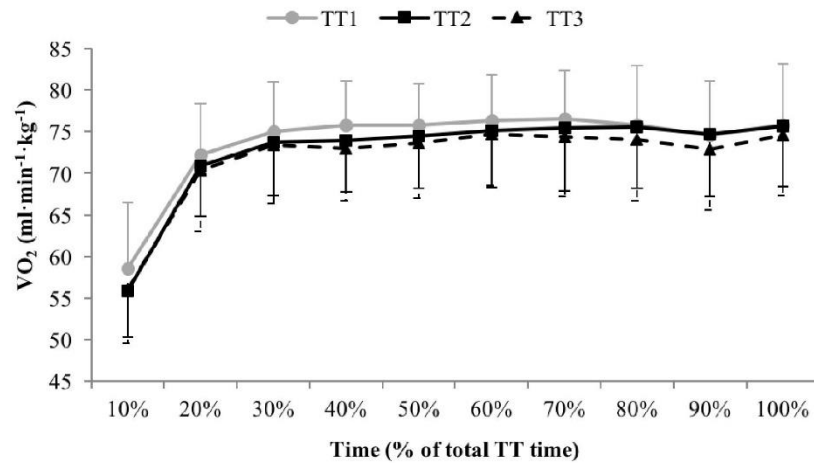


Figure 4. Evolution of oxygen consumption (VO₂) over time during each uphill time trial (TT).

DISCUSSION

The results of this study show that young elite cyclists are able to repeat the same global pacing strategy during three repeated uphill TTs in order to achieve the best performance possible. The percentage of time spent at APO and the mean PO remained remarkably stable and high during the three TTs, with no significant difference between 0 and 90% of the TT duration. These results suggest that exercise intensity is centrally regulated very well in elite cyclists on the basis of a predetermined end-point, as proposed by the central governor model (Noakes et al. 2005). This concept suggests that self-selected exercise intensity is continuously regulated within the brain based on a complex algorithm involving peripheral feedback and the anticipated remaining workload. This “teleoanticipatory” self-selection of pacing strategy must allow the athlete to identify the optimal exercise intensity in order to achieve best performance, without exhaustion or any excessive fatigue before the finish. Our results suggest that these central regulation mechanisms were extremely accurate and efficient in our elite athletes, despite their young age (20.9 ± 2.3 years), allowing them to perfectly regulate their effort and to achieve outstanding physical performance (mean PO and VO₂ of 6.2 ± 0.4 W·kg⁻¹ and 75.0 ± 6.3 ml·min⁻¹·kg⁻¹, respectively, for a total effort duration of $23 \text{ min } 30 \text{ s} \pm 1 \text{ min } 13 \text{ s}$). To the best of our knowledge, this is the first study to highlight this

1 noteworthy precision of elite cyclists for maintaining a constant pacing strategy during
2 repeated uphill TTs.

3

4 As previously observed in several studies involving self-selected pacing strategies, PO only
5 increased in the last 10% of the TT3, creating an “end-spurt”. However, the PO of this
6 end-spurt was low, and the duration was short relative to the overall duration of the exercise
7 (+14.1% over 47 ± 2 s for a total effort duration of $23 \text{ min } 30 \pm 1 \text{ min } 13 \text{ s}$), compared to
8 previous studies with less experienced athletes (Micklewright et al. 2010; Thomas et al.
9 2012). The very high level of physiological strain maintained over the TTs (mean VO_2 and
10 RER of $94 \pm 5\%$ of $\text{VO}_{2\text{max}}$ and 1.01 ± 0.04 , respectively), suggests that the optimal self-
11 selected pacing strategies of elite athletes allow them to reach the finish in a state very close
12 to their physiological limits. Thus, they are only able to slightly increase exercise intensity for
13 the end-spurt, likely due to a greater motivation when only a short effort duration is
14 remaining, as demonstrated by Marcora and Staiano (Marcora and Staiano 2010). Further
15 studies with quantification of the physiological reserves remaining after exercise are needed
16 to verify these assumptions, but it is still possible to hypothesize from these results that
17 optimal pacing strategies of elite athletes allow them to have a greater use of their
18 physiological potential and to reach the finish with minimal physiological reserves still
19 available.

20

21 As mentioned by St-Clair Gibson et al., PO data also illustrate “quantal units of information”
22 sent by the brain via the motor nerves in order to control muscular contraction (St Clair
23 Gibson et al. 2006; St Clair Gibson et al. 2018). Thus, the non-monotonic variations of the PO
24 signal are not simply random measurement noise, but rather illustrate each correction
25 performed by the brain after integration of the feedback returning from different peripheral
26 systems. To the best of our knowledge, this study is the first to quantify this phenomenon via
27 the EVA method. The results of this analysis also underline the great regulation capacities of
28 our subjects, which allow them to maintain a remarkably stable and high PO over the TTs. All
29 the athletes spent most of the time at an accurate PO for an optimal constant pacing strategy
30 (APO, $71 \pm 12\%$ of total effort duration). Furthermore, when PO left this optimal constant
31 zone, for the most part the athletes quickly corrected exercise intensity (in less than 10 s,
32 REG, $22 \pm 9\%$), and very few efforts remained with prolonged time (more than 10 s) at a too
33 high or too low PO (IPO, $7 \pm 5\%$). This very accurate “template” of exercise intensity
34 regulation also remained stable over the three TTs, despite the accumulating efforts at a high

1 exercise intensity, with only a significant increase of time spent at IPO in TT3, which was
2 mainly explained by the end-spurt (with $56 \pm 31\%$ of the additional time spent at IPO during
3 TT3 occurring in the last 10% of total TT time). These results suggest that young elite cyclists
4 possess a strong brain template of exercise intensity regulation that allows them to precisely
5 regulate high levels of PO during repeated TTs. The integration of this strong brain template
6 of exercise intensity regulation probably implies considerable hours of self-paced training and
7 can partly explain the remarkable ability of elite athletes to sustain high exercise intensity
8 over prolonged periods of time.

9

10 The strong template of exercise intensity regulation seemed to be mainly regulated from RPE.
11 Indeed, even though RPE was already high during the first two TTs, it still increased to near
12 maximal values at the end of TT3. It seems that exercise intensity was regulated across all
13 TTs, with the aim to reach maximal perceived exertion only when crossing the finish line of
14 the last TT, which is essential to achieve the best possible performance (Noakes et al. 2005).
15 In this regard, recent psychophysiological models of endurance performance (Marcora and
16 Staiano 2010; Tucker 2009) have proposed that RPE is the main determinant of fatigue and
17 exhaustion, limiting muscle fibre recruitment by the brain in order to preserve physiological
18 homeostasis during an effort. Thus, optimal exercise intensity regulation must allow for a
19 controlled rise of RPE, with a maximal value only occurring at the end of the exercise to
20 prevent the anticipated exhaustion and large decrease in PO. Our results confirm this
21 hypothesis, demonstrating that elite cyclists are able to finely regulate exercise intensity over
22 repeated and prolonged high intensity exercises in order to provide a controlled rise in the
23 RPE, with a maximal value only occurring at the end of the effort.

24

25 The high level of expertise in exercise intensity regulation of our elite cyclists allowed them
26 to maintain high effort intensity and avoid exhaustion despite the high level of physiological
27 strain during the TTs. Mean VO_2 and HR remained stable over the TTs, with the same
28 evolution during the three TTs. Only mean VCO_2 and cadence were significantly decreased
29 during TT2 ($-3.5 \pm 2.3\%$ and $-1.6 \pm 1.3\%$, respectively) and TT3 ($-5.0 \pm 1.4\%$ and $-3.0 \pm$
30 1.5% , respectively) compared with TT1. Thus, physiological state remained generally stable
31 over the three TTs, despite the very high intensity of the effort. These results are in
32 accordance with the hypothesis of recent psychophysiological models of endurance
33 performance, which explained that fatigue and exhaustion are not related to disturbance of
34 physiological homeostasis, but rather to a decrease of central command (Marcora and Staiano

1 2010; Noakes et al. 2005; Tucker 2009). The great pacing capacities and mental strength
2 (Jones 2002) of our young elite cyclists allowed them to tolerate a very high level of
3 physiological strain, but the perturbations were still insufficient to disturb homeostasis and to
4 prevent muscular contraction derived from only peripheral changes.

5

6 **CONCLUSION**

7

8 This ecological study is the first that reports the effect of repeated uphill TTs on pacing
9 regulation according to the requirements of the competition in young elite cyclists. The
10 findings show that young elite cyclists present noteworthy pacing capacities, allowing them to
11 perform at a similar mean PO in three consecutives uphill TTs. Despite the very high level of
12 exercise intensity, the physiological state of the cyclists remained relatively stable over the
13 three TTs, illustrating that performance was not limited by physiological disturbance of
14 homeostasis.

15

16 The results of this study are interesting for coaches and scientists because they show that
17 pacing capacities are one of the main characteristics that allow elite cyclists to sustain very
18 high exercise intensity during repeated climbs, which are observed in professional mountain
19 stages. It would be interesting for future studies to determine whether these pacing abilities
20 are genetically determined or whether they are acquired after prolonged hours of training and
21 practice. This study is also the first to quantify the brain control mechanisms illustrated by the
22 non-random fluctuations of PO during self-paced TTs via the EVA method. This innovative
23 method provides a novel technique for scientists to further analyse pacing strategies and
24 elucidate brain regulation mechanisms involved during self-paced endurance exercises.
25 Further studies are also needed to determine if this method can be used by coaches in the field
26 to monitor and quantify the ability of their athletes to optimally regulate the effort during
27 self-paced TTs.

28

1 **Authors contribution**

2 AB and FG designed the study. AB and TO conducted experimentations. AB and TO
3 analysed data and wrote the manuscript. FG revised the manuscript. All authors read and
4 approved the content of the manuscript.

5

6 **Acknowledgments**

7 The authors wish to thank all participating cyclists and most particularly those of the “Cycle
8 Formation FDJ” for their cooperation.

9

10 **Compliance with ethical standards**

11

12 **Ethical approval**

13 This study was conducted in accordance with the ethical principles of the 1964 Declaration of
14 Helsinki and approved by the institutional ethics committee.

15

16 **Informed consent**

17 Prior to testing, all participants gave a voluntary written informed consent which indicates the
18 purpose, the benefits and the risks of the investigation and the possibility to stop their
19 participation at any time.

20

21 **Conflict of interest**

22 The authors declare that they have no conflict of interest.

23

1 **References**

2

3 Abbiss CR, Laursen PB (2008) Describing and understanding pacing strategies during athletic
4 competition. *Sports Med* 38:239-252

5 Abbiss CR, Straker L, Quod MJ, Martin DT, Laursen PB (2010) Examining pacing profiles in
6 elite female road cyclists using exposure variation analysis. *Br J Sports Med* 44:437-
7 442

8 Abbiss CR, Thompson KG, Lipski M, Meyer T, Skorski S (2016) Difference in pacing
9 between time-and distance-based time trials in trained cyclists. *International journal of*
10 *sports physiology and performance* 11:1018-1023

11 Aisbett B, Le Rossignol P, McConnell GK, Abbiss CR, Snow R (2009a) Effects of starting
12 strategy on 5-min cycling time-trial performance. *J Sports Sci* 27:1201-1209
13 doi:10.1080/02640410903114372

14 Aisbett B, Lerossignol P, McConnell GK, Abbiss CR, Snow R (2009b) Influence of all-out and
15 fast start on 5-min cycling time trial performance. *Med Sci Sports Exerc* 41:1965-
16 1971 doi:10.1249/MSS.0b013e3181a2aa78

17 Atkinson G, Peacock O, Passfield L (2007) Variable versus constant power strategies during
18 cycling time-trials: prediction of time savings using an up-to-date mathematical
19 model. *J Sports Sci* 25:1001-1009

20 Borg G, Ljunggren G, Ceci R (1985) The increase of perceived exertion, aches and pain in the
21 legs, heart rate and blood lactate during exercise on a bicycle ergometer. *Eur J Appl*
22 *Physiol Occup Physiol* 54:343-349

23 Bouillod A, Pinot J, Soenen F, Ouvrard T, Grappe F (2017) Dependence of the Nature of the
24 Pedaling Activity on Maximal Aerobic Power in Cycling. *Int J Sports Physiol Perform*
25 12:44-49 doi:10.1123/ijsspp.2015-0489

26 Brick NE, MacIntyre TE, Campbell MJ (2014) Attentional focus in endurance activity: new
27 paradigms and future directions. *Int Rev Sport Exerc Psychol* 7:106-134

28 Buchheit M, Laursen PB (2013) High-intensity interval training, solutions to the
29 programming puzzle. *Sports medicine* 43:927-954

30 Foster C, Snyder AC, Thompson NN, Green MA, Foley M, Schrager M (1993) Effect of
31 pacing strategy on cycle time trial performance. *Med Sci Sports Exerc* 25:383-388

32 Hettinga FJ, De Koning JJ, Broersen FT, Van Geffen P, Foster C (2006) Pacing strategy and
33 the occurrence of fatigue in 4000-m cycling time trials. *Medicine & Science in Sports*
34 *& Exercise* 38:1484-1491

- 1 Jones G (2002) What is this thing called mental toughness? An investigation of elite sport
2 performers. *J Appl Sport Psychol* 14:205-218
- 3 Lander PJ, Butterly RJ, Edwards AM (2009) Self-paced exercise is less physically
4 challenging than enforced constant pace exercise of the same intensity: influence of
5 complex central metabolic control. *Br J Sports Med* 43:789-795
- 6 Macfarlane D, Wong P (2012) Validity, reliability and stability of the portable Cortex
7 Metamax 3B gas analysis system. *European journal of applied physiology* 112:2539-
8 2547
- 9 Marcora SM, Staiano W (2010) The limit to exercise tolerance in humans: mind over muscle?
10 *Eur J Appl Physiol* 109:763-770 doi:10.1007/s00421-010-1418-6
- 11 Mauger AR, Jones AM, Williams CA (2009) Influence of feedback and prior experience on
12 pacing during a 4-km cycle time trial. *Med Sci Sports Exerc* 41:451-458
13 doi:10.1249/MSS.0b013e3181854957
- 14 Micklewright D, Papadopoulou E, Swart J, Noakes T (2010) Previous experience influences
15 pacing during 20 km time trial cycling. *British Journal of Sports Medicine* 44:952-960
- 16 Noakes TD, St Clair Gibson A, Lambert EV (2005) From catastrophe to complexity: a novel
17 model of integrative central neural regulation of effort and fatigue during exercise in
18 humans: summary and conclusions. *Br J Sports Med* 39:120-124
19 doi:10.1136/bjsm.2003.010330
- 20 Ouvrard T, Gros Lambert A, Grappe F (2018a) The Influence of Pleasure and Attentional
21 Focus on Performance and Pacing Strategies in Elite Individual Time Trials.
22 *International journal of sports physiology and performance*:1-22
- 23 Ouvrard T, Gros Lambert A, Ravier G, Grosprêtre S, Gimenez P, Grappe F (2018b)
24 Mechanisms of Performance Improvements Due to a Leading Teammate During
25 Uphill Cycling. *International journal of sports physiology and performance*:1-25
- 26 Peiffer JJ, Abbiss CR (2011) Influence of environmental temperature on 40 km cycling time-
27 trial performance. *Int J Sports Physiol Perform* 6:208-220
- 28 St Clair Gibson A, Lambert EV, Rauch LH, Tucker R, Baden DA, Foster C, Noakes TD
29 (2006) The role of information processing between the brain and peripheral
30 physiological systems in pacing and perception of effort. *Sports Med* 36:705-722
- 31 St Clair Gibson A, Swart J, Tucker R (2018) The interaction of psychological and
32 physiological homeostatic drives and role of general control principles in the
33 regulation of physiological systems, exercise and the fatigue process - The Integrative
34 Governor theory. *Eur J Sport Sci* 18:25-36 doi:10.1080/17461391.2017.1321688

- 1 Swain DP (1997) A model for optimizing cycling performance by varying power on hills and
- 2 in wind. *Med Sci Sports Exerc* 29:1104-1108
- 3 Thomas K, Stone MR, Thompson KG, St Clair Gibson A, Ansley L (2012) Reproducibility of
- 4 pacing strategy during simulated 20-km cycling time trials in well-trained cyclists. *Eur*
- 5 *J Appl Physiol* 112:223-229 doi:10.1007/s00421-011-1974-4
- 6 Tucker R (2009) The anticipatory regulation of performance: the physiological basis for
- 7 pacing strategies and the development of a perception-based model for exercise
- 8 performance. *Br J Sports Med* 43:392-400 doi:10.1136/bjsm.2008.050799
- 9 Tucker R, Bester A, Lambert EV, Noakes TD, Vaughan CL, St Clair Gibson A (2006) Non-
- 10 random fluctuations in power output during self-paced exercise. *Br J Sports Med*
- 11 40:912-917 doi:10.1136/bjsm.2006.026435
- 12 Vogler AJ, Rice AJ, Gore CJ (2010) Validity and reliability of the Cortex MetaMax3B
- 13 portable metabolic system. *Journal of sports sciences* 28:733-742
- 14 Wooles AL, Robinson AJ, Keen PS (2005) A static method for obtaining a calibration factor
- 15 for SRM bicycle power cranks. *Sports Eng* 8:137-144
- 16

CHAPITRE 5 : Mécanismes biomécaniques et psychologiques à l'origine de l'amélioration des performances en présence d'un équipier en montée en cyclisme

Les résultats de cette étude ont fait l'objet d'un article accepté dans la revue *International Journal of Sports Physiology and Performance* (Ouvrard, Gros Lambert, Ravier, Grosprêtre, Gimenez et Grappe, *publié en ligne avant impression*) : « Mechanisms of Performance Improvements Due to a Leading Teammate During Uphill Cycling ».

Résumé détaillé :

Mechanisms of Performance Improvements Due to a Leading Teammate During Uphill Cycling

Ouvrard T., Gros Lambert A., Ravier G., Grosprêtre S., Gimenez P., et Grappe F.

Introduction :

Depuis le début des années 2000, les stratégies utilisées et le déroulement des ascensions lors des principales étapes de montagne des plus grandes courses cyclistes sont extrêmement stéréotypés. Dès le pied des principaux cols, les équipiers des plus grandes formations viennent se placer à l'avant du peloton principal, avec leurs leaders directement placés derrière eux, dans le but d'imposer un tempo très élevé. Bien que cette stratégie soit désormais omniprésente lors des courses cyclistes de haut-niveau et est automatiquement utilisée par les principales équipes s'affrontant pour le classement général final, son impact sur les principaux déterminants de la performance n'a pas encore été étudié.

La réduction de la traînée aérodynamique lorsque le leader se trouve dans la roue de son équipier, appelée effet d'aspiration, représenterait le principal gain pour la performance d'un point de vue biomécanique (Kyle 1979). Cependant, les équations biomécaniques de la performance cycliste montrent qu'en montée la majeure partie des forces résistantes qui s'opposent au déplacement sont dues au poids (Martin *et coll.*, 1998, Millet *et coll.*, 2014). Une

précédente étude a même suggéré que, pour des pentes supérieures à 7,2 %, l'impact de la vitesse et donc de la traînée aérodynamique sur la dépense énergétique serait négligeable (Mognoni et Di Prampero 2003). Si l'effet de l'aspiration sur la performance cycliste en montée n'a pas encore été directement étudié, ces résultats suggèrent malgré tout que la présence d'un équipier devant son leader n'aurait qu'un impact réduit sur les déterminants biomécaniques de la performance.

En revanche, il est possible de supposer que la présence d'un équipier devant son leader en montée aurait un impact significatif sur les déterminants psychologiques de la performance. En effet, il a été montré que la présence d'un autre cycliste (en situation compétitive) influencerait directement le focus attentionnel de l'athlète, lui permettant ainsi d'améliorer ses performances (Corbett *et coll.*, 2012, Williams *et coll.*, 2015, Konings *et coll.*, 2017). D'après Brick *et coll.*, cette présence d'autres compétiteurs permettrait d'augmenter les indices externes facilitant la régulation de l'effort, réduisant ainsi les pensées liées aux sensations corporelles négatives pendant l'effort, au profit de pensées liées au contrôle actif de l'action ou à des éléments externes pertinents pour la performance (Brick *et coll.*, 2014, Brick *et coll.*, 2016a, Brick *et coll.*, 2016b). Le même effet pourrait être attendu en présence d'un équipier en montée, permettant à son leader d'optimiser son focus attentionnel et d'améliorer ses performances.

Enfin, d'après les athlètes et les entraîneurs sur le terrain, l'un des principaux objectifs d'imposer un tempo élevé de cette manière en montée serait de protéger le leader de l'équipe des attaques de ses adversaires. L'objectif des équipiers dans ces situations est en effet de maintenir la plus haute intensité d'effort que leur leader est capable de maintenir sur l'ensemble de la montée de manière constante. Cette stratégie permettrait ainsi pour le leader de maintenir une intensité d'effort constante sur l'ensemble de la montée et de réduire la fatigue et les pertes biomécaniques dues aux changements de vitesse non-désirés (Swain 1997, Atkinson *et coll.*, 2007a, Abbiss et Laursen 2008).

Ainsi, les mécanismes à l'origine de la performance d'un leader peuvent être influencés par la présence d'équipiers imposant le tempo en montée. Cependant, même si ces différents paramètres ont déjà été étudiés indépendamment en laboratoire, le véritable impact de cette stratégie sur la performance réelle de terrain reste à déterminer. L'objectif de cette étude était de déterminer l'influence d'un équipier imposant le tempo sur la performance de son leader placé derrière lui lors d'une montée à intensité maximale réalisée sur le terrain. Nous avons émis l'hypothèse que cette présence de l'équipier permettrait d'augmenter l'intensité d'exercice

tolérée par le leader et ainsi d'améliorer ses performances, principalement en raison d'une modification de son focus attentionnel et d'une réduction des variations d'intensité d'effort.

Méthodes :

Douze cyclistes compétiteurs ont participé à cette étude. Elle comprenait trois sessions, chacune impliquant une montée CLM de 2,7 km à $7,4 \pm 1,2$ %, réalisé après un échauffement standardisé et avec le même équipement dans le but de conserver des résistances à l'avancement identiques lors que chaque montée. La première session consistait en une session de familiarisation, où le CLM était réalisé par le sujet seul. Les deux sessions suivantes consistaient en des CLM réalisés en conditions leader ou contrôle, en ordre randomisé. En condition leader, les participants ont réalisé la montée CLM accompagnés d'un équipier imposant le tempo, simulé par un expérimentateur à l'aide d'un vélo électrique. Les sujets étaient informés que l'équipier resterait devant eux pour l'ensemble de la montée, répliquant initialement leur propre vitesse recueillie lors de la session de familiarisation, puis ajustant ensuite son allure en fonction des consignes verbales qu'ils lui donneraient, ou en ralentissant s'ils n'étaient plus capables de suivre le tempo imposé. Afin de simuler le plus fidèlement possible le comportement d'un véritable équipier en condition réelle, l'expérimentateur choisi pour remplir ce rôle d'équipier était un ancien cycliste expérimenté, ayant déjà endossé ce rôle lors de compétitions officielles de niveau régional. En condition contrôle, les participants effectuaient l'ensemble de la montée seuls, comme un CLM classique de terrain. Indépendamment des conditions, les participants avaient pour consigne de gérer leur effort afin de réaliser le plus court temps possible sur l'ensemble de la montée CLM. Les trois CLM étaient séparés de 48 heures de récupération complète au minimum, et étaient réalisés au même moment de la journée (± 2 heures). Lors de chaque montée, la $P_{méca}$ développée était recueillie à l'aide d'un capteur SRM, dans le but, pour chaque condition, de déterminer la $P_{méca}$ moyenne et de quantifier les temps passés à APO, IPO et REG à l'aide de la méthode EVA. La lactatémie post-exercice, le plaisir ressenti et la RPE étaient également recueillis à la fin de chaque montée. Les pourcentages de pensées liées aux différentes catégories de focus attentionnel (1, les pensées liées aux sensations corporelles pendant l'effort ; 2, les pensées liées au contrôle de l'action ou des émotions ; 3, les pensées liées à des éléments externes pertinents pour la performance ; 4, les distractions générées activement par l'athlète ; 5, les distractions liées à un stimulus externe) étaient également recueillis à l'aide de questionnaires subjectifs à la fin de chaque montée (Brick *et coll.*, 2014, Brick *et coll.*, 2016a). Enfin, les améliorations de performance en condition leader dues à une possible diminution de la traînée aérodynamique en raison du phénomène d'aspiration ont été quantifiés à l'aide des

équations biomécaniques du déplacement en cyclisme (Martin *et coll.*, 1998, Millet *et coll.*, 2014). Tout d'abord, les forces de résistance totales (R_T , en N) ont été calculées dans les deux conditions à l'aide de la formule :

$$R_T = P_{\text{méca}} \cdot V^{-1},$$

où V correspond à la vitesse moyenne de la montée (en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) et $P_{\text{méca}}$ à la puissance moyenne développée en W . La masse totale de l'ensemble cycliste-bicyclette et la pression des pneus étant identiques entre les deux conditions, la différence de R_T entre les deux CLM a été attribuée à une réduction de trainée aérodynamique en raison de l'aspiration en condition leader. Ainsi, une vitesse théorique « condition leader sans effet d'aspiration » ($V_{\text{leader/aspiration}}$, en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) a ensuite été calculée à partir de la formule :

$$V_{\text{leader/aspiration}} = P_{\text{leader}} \cdot R_{T\text{-contrôle}}^{-1},$$

où P_{leader} correspond à la $P_{\text{méca}}$ moyenne développée en condition leader, et $R_{T\text{-contrôle}}$ aux résistances totales à l'avancement calculées en condition contrôle. Ensuite, les gains de performance dus à la diminution de trainée aérodynamique en condition leader ont été quantifiés comme la différence entre la performance en condition leader, et le temps estimé pour parcourir l'ensemble de la montée à $V_{\text{leader/aspiration}}$.

Les différences de performance (en secondes), d'intensité d'exercice ($P_{\text{méca}}$ moyenne, fréquence cardiaque moyenne et lactatémie post-exercice), des paramètres psychologiques (RPE, plaisir ressenti et pourcentage de pensées dans les différentes catégories de focus attentionnel), de R_T , et de temps passés à APO, IPO et REG entre les conditions leader et contrôle ont été analysées à l'aide de tests t appariés. De plus, l'amplitude des différences entre les conditions ont été interprétées à l'aide d'effect-size, calculés selon le d de Cohen (Cohen 1992). A l'inverse, comme le test de Shapiro-Wilk a révélé que les données ne suivaient pas une loi normale, la $P_{\text{méca}}$ moyenne pour chaque section de 10 % de la montée CLM a été comparé entre les conditions leader et contrôle à l'aide de plusieurs tests Wilcoxon de rang, afin de comparer les stratégies de gestion de l'effort dans les deux conditions.

Résultats :

La performance lors de la montée CLM a été significativement améliorée en condition leader par rapport à la condition contrôle (-23 ± 22 s soit $-4,2 \pm 3,1$ % ; effect-size = 0,47 ; $p = 0,002$; **Figure 29**). Cependant, aucun effet de la condition n'était observable sur la $P_{\text{méca}}$ moyenne développée (**Figure 29**), la fréquence cardiaque moyenne, la lactatémie post-exercice ou la

RPE. En conséquence, les gains de performances semblent principalement liés à une réduction significative de R_T en condition leader due à l'effet d'aspiration ($-2,3 \pm 2,3 \%$; effect-size = 0,28 ; $p = 0,01$), qui peut expliquer 13 ± 26 s soit 57,8 % des gains de performance totaux ($V_{\text{leader/aspiration}} = 18,4 \pm 1,5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ vs $18,8 \pm 1,6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ de vitesse moyenne en condition leader). Le temps passé à REG a significativement augmenté en condition leader comparé à la condition contrôle ($+29,3 \pm 29,9\%$; effect-size = 0,79 ; $p = 0,02$) alors qu'une tendance non-significative à la diminution du temps passé à APO en condition leader est également observable ($9,6 \pm 18,6\%$; effect-size = -0,62 ; $p = 0,09$). Aucune différence significative de focus attentionnel n'est observable entre les deux conditions, en revanche une augmentation significative du plaisir ressenti était présente en condition leader par rapport à la condition contrôle ($+41,1 \pm 51,7\%$; effect-size = 0,76 ; $p = 0,008$).

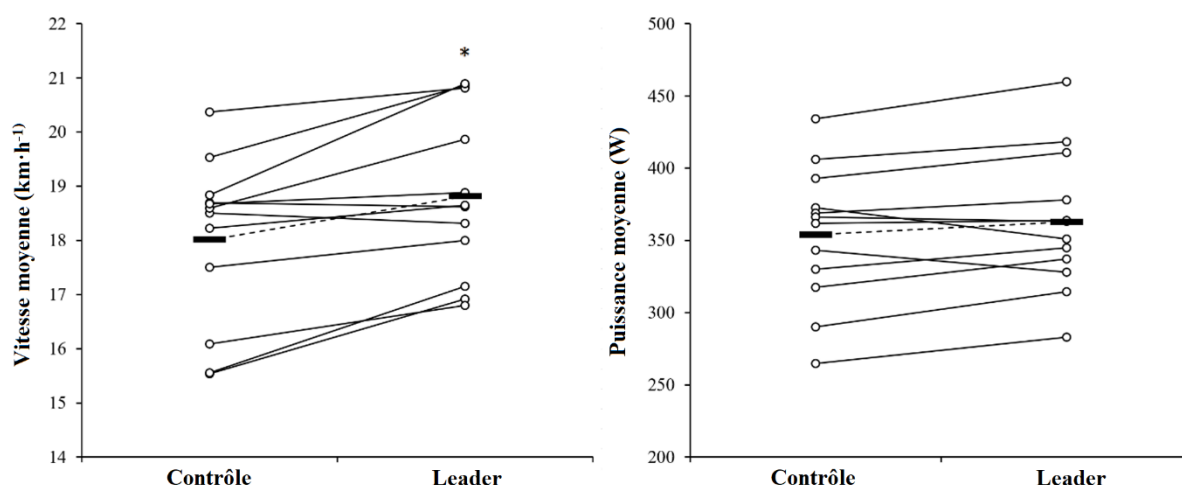


Figure 29. Différences moyennes (—) et inter-individuelles (○) de $P_{\text{méca}}$ moyenne développée et de vitesse moyenne entre les conditions leader et contrôle (*, significativement différent de la condition contrôle ; $p < 0,01$).

Si la $P_{\text{méca}}$ développée ne varie pas en moyenne entre les conditions et entre 0 et 90 % de la durée de la montée CLM, une $P_{\text{méca}}$ significativement plus élevée était observée en condition leader par rapport à la condition contrôle entre 90 et 100 % de la durée de la montée ($+32 \pm 32$ W soit $9,1 \pm 9,1 \%$; effect-size = 0,45 ; $p = 0,03$: **Figure 30**).

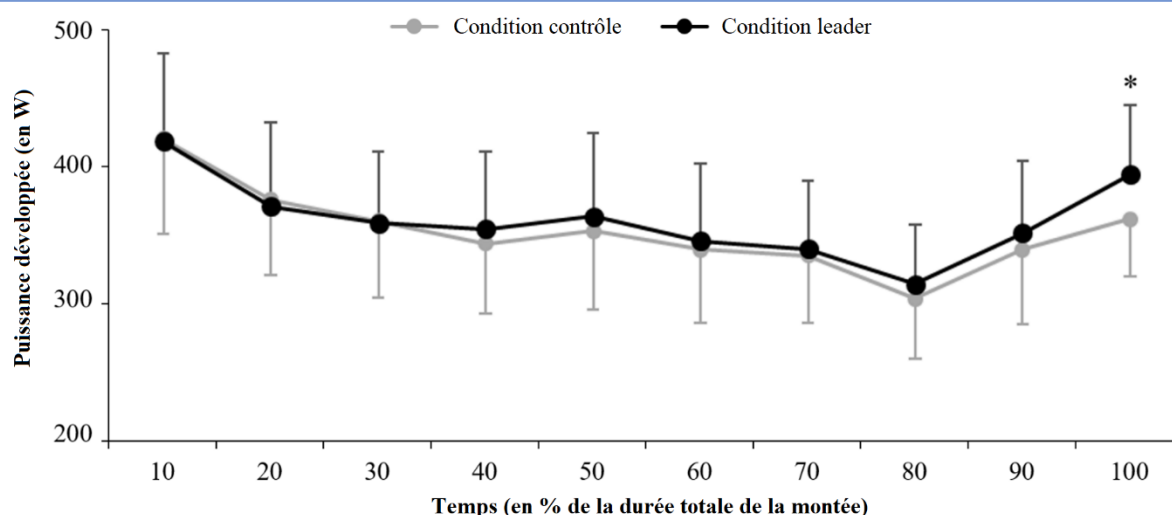


Figure 30. Evolution de la puissance moyenne lors de la montée en condition leader et en condition contrôle (*, différence significative entre les conditions leader et contrôle, $p < 0,05$).

Discussion :

Dans le cyclisme moderne, les équipiers imposent désormais systématiquement le tempo devant leurs leaders afin de les protéger lors des principales ascensions des étapes de montagne. Cette étude de terrain est la première à démontrer que la performance du leader pouvait être significativement améliorée grâce à cette stratégie.

Nos résultats montrent que la performance d'un leader en montée CLM peut être améliorée de $4,2 \pm 3,1$ % en présence d'un équipier. Ces gains sont comparables à ceux observables à la suite d'un programme d'entraînement spécifique (en général inférieurs à 4 %) (Stepto *et coll.*, 1999, Capostagno *et coll.*, 2014), d'une consommation de substances ergogènes (c'est à dire caféine ou boissons énergisantes, de 2,8 à 6,5 %) (Mcnaughton *et coll.*, 2008, Quinlivan *et coll.*, 2015) ou d'interventions psychologiques (tels que du self-talk motivationnels, 3,8 %) (Barwood *et coll.*, 2015). Ces gains peuvent même être considérés comme très importants lorsque comparés aux très faibles différences de performance entre les cyclistes s'affrontant pour les huit premières places du classement général lors des Grands Tours (entre 0,7 % pour le classement général final et 2,2 % pour les étapes avec les plus grands écarts de performance, à savoir les CLM) (Paton et Hopkins 2006). Cet impact considérable sur la performance suggère clairement qu'il serait désormais difficile pour tout cycliste professionnel de remporter un Grand Tour sans avoir recours à cette stratégie.

Ces gains semblent être principalement liés à la diminution de trainée aérodynamique ($2,3 \pm 2,3\%$) due à l'effet d'aspiration derrière l'équipier imposant le tempo. En effet, d'après les équations biomécaniques de la performance, cette diminution de R_T expliquerait 57,8 % des gains de performance totaux en condition leader (soit -13 ± 26 s). Cette étude est la première à mettre en évidence que l'effet d'aspiration peut avoir un impact aussi important sur la performance cycliste en montée. Souvent négligé dans le passé (Mognoni et Di Prampero 2003), ce facteur semble être la raison principale permettant aux leaders d'améliorer leurs performances grâce à la protection d'un équipier en montée.

A l'inverse, la présence de l'équipier n'a pas permis aux participants d'augmenter leur intensité d'effort consentie lors de la montée CLM. Ces résultats vont à l'encontre des études précédentes ayant démontré que la présence d'autres compétiteurs permettaient d'augmenter la $P_{méca}$ moyenne lors de CLM en laboratoire. Ces résultats contradictoires peuvent notamment s'expliquer par le fait que ces précédentes études ont été réalisées dans des situations compétitives avec cet autre cycliste, alors que notre condition leader implique davantage une situation coopérative avec l'équipier. Cette différence de contexte semble ainsi impliquer un effet différent sur le focus attentionnel du cycliste en condition leader, ce qui pourrait expliquer pourquoi les participants n'ont pas été en mesure d'augmenter leur niveau d'effort consenti dans cette condition. En effet, les précédentes études ont montré que cette augmentation de l'intensité d'effort consentie en présence d'un adversaire était notamment liée à une diminution des pensées internes et une augmentation des pensées externes ou des distractions, permettant ainsi de réduire la RPE pour un même niveau de $P_{méca}$ développée (Williams *et coll.*, 2015). A l'inverse dans notre étude, le focus attentionnel n'était pas significativement différent entre les conditions, ce qui pourrait expliquer pourquoi les participants n'ont pas été en mesure de fournir un effort plus intense malgré la présence de l'équipier.

Ces résultats contradictoires concernant le focus attentionnel peuvent également s'expliquer en raison des différences de contextes entre les efforts réalisés. En effet, les précédentes études ont analysé l'impact de la présence d'un adversaire sur la performance cycliste lors de CLM réalisés en laboratoire. Il est possible que cet environnement de laboratoire, qui est en général neutre et très standardisé, offre très peu de possibilités de distractions ou de pensées externes et contraindrait donc les cyclistes à rester principalement focalisés sur des pensées internes liées à leurs sensations corporelles. Dès lors, ajouter une nouvelle forme de distraction, telle que la présence d'un adversaire, aurait dans ce contexte un impact important sur le focus attentionnel et la performance des athlètes. A l'inverse, notre étude a été réalisée dans des conditions de

terrain, qui offrent à la base plusieurs sources possibles de distractions ou de pensées externes pour l'athlète (par exemple l'état ou la pente de la route, le paysage environnant...). Dans ce contexte, l'ajout d'un autre cycliste représente une différence plus réduite de contexte environnemental, qui influencerait donc moins le focus attentionnel et la performance des cyclistes.

Enfin, bien qu'aucune différence significative de $P_{méca}$ moyenne ne soit observable entre les conditions, les mécanismes de régulation de l'effort, quantifiés à l'aide de la méthode EVA, étaient significativement différents entre les conditions. En effet, les participants ont réalisé plus de courts ajustements de $P_{méca}$ en condition leader (augmentation du temps passé à REG ; $+29,3 \pm 29,9\%$; effect-size = 0,79 ; $p = 0,02$) et ont moins maintenu un niveau de $P_{méca}$ constant (diminution du temps passé à APO ; $-9,6 \pm 18,6\%$; effect-size = -0,62 ; $p = 0,09$). Ces résultats suggèrent que les mécanismes de régulation de l'effort seraient différents en condition leader en comparaison à la condition contrôle. D'après certains auteurs, ces variations plus fréquentes d'intensité d'effort pourraient augmenter la fatigue et les pertes biomécaniques (Abbiss et Laursen 2008, Wells *et coll.*, 2013), ce qui pourrait notamment expliquer pourquoi les participants n'ont pas été en mesure d'augmenter leur $P_{méca}$ développée sur la globalité de la montée CLM en condition leader.

A l'inverse, une augmentation de la $P_{méca}$ développée dans les derniers 10 % de la montée a été observée en condition leader par rapport à la condition contrôle, illustrant un end-spurt plus important ($+9,1 \pm 9,1\%$; effect-size = 0,76 ; $p = 0,008$). Nos résultats montrent que cet end-spurt plus important serait notamment lié à des paramètres psychologiques différents en condition leader, et notamment à un plaisir ressenti plus important ($+41,1 \pm 51,7\%$; effect-size = 0,76 ; $p = 0,008$). D'après les récents modèles psychophysiologiques de la performance (Tucker 2009, Marcora et Staiano 2010a, Baron *et coll.*, 2011), le plaisir ressenti et les émotions positives joueraient un rôle majeur pour la performance, permettant à l'athlète de maintenir des intensités d'exercice plus élevées. Marcora et Staiano ont notamment expliqué qu'une augmentation des paramètres psychologiques positifs à l'approche de l'arrivée serait à l'origine du end-spurt, permettant alors à l'athlète de supporter une intensité d'effort plus importante dans les derniers 10 % de la durée d'exercice (Marcora et Staiano 2010a). Ainsi, plus ces paramètres psychologiques positifs augmenteraient de manière importante et plus cet end-spurt serait important. Nos résultats montrent que ce phénomène serait le principal bénéfice psychologique de la présence d'un équipier en montée, permettant à son leader de maintenir un

plaisir ressenti plus important tout au long de l'exercice et de réaliser ainsi un effort plus important lors des derniers mètres de la montée.

Conclusions et perspectives :

Dans le cyclisme moderne, les meilleures équipes protègent systématiquement leurs leaders grâce à leurs équipiers lors des principales montées des étapes de montagne. Cette étude écologique est la première à montrer que cette stratégie permet d'améliorer significativement la performance du leader, principalement en raison de gains aérodynamiques et de modifications des paramètres psychologiques lui permettant de réaliser un end-spurt plus important. Ces résultats mettent en évidence la nécessité d'étudier la performance de haut-niveau à l'aide de modèles multidisciplinaires prenant en compte les différents domaines susceptibles d'influencer la performance finale. Les différences entre les meilleurs athlètes lors des plus grandes courses cyclistes étant minimes, même des déterminants mineurs de la performance, tels que le end-spurt ou l'effet d'aspiration en montée, peuvent avoir un impact majeur sur le classement final et ne doivent pas être négligés.

"Mechanisms of Performance Improvements Due to a Leading Teammate During Uphill Cycling" by Ouvrard O et al.
International Journal of Sports Physiology and Performance
© 2018 Human Kinetics, Inc.

Note. This article will be published in a forthcoming issue of the *International Journal of Sports Physiology and Performance*. The article appears here in its accepted, peer-reviewed form, as it was provided by the submitting author. It has not been copyedited, proofread, or formatted by the publisher.

Section: Original Investigation

Article Title: Mechanisms of Performance Improvements Due to a Leading Teammate During Uphill Cycling

Authors: Theo Ouvrard¹, Alain Gros Lambert¹, Gilles Ravier¹, Sidney Grosprêtre¹, Philippe Gimenez¹, and Frederic Grappe^{1,2}

Affiliations: ¹ EA4660, C3S Health - Sport Department, Sports University, Besancon, France.
² Professional Cycling Team FDJ, Moussy le Vieux, France.

Journal: *International Journal of Sports Physiology and Performance*

Acceptance Date: March 29, 2018

©2018 Human Kinetics, Inc.

DOI: <https://doi.org/10.1123/ijsp.2017-0878>

"Mechanisms of Performance Improvements Due to a Leading Teammate During Uphill Cycling" by Ouvrard O et al.
International Journal of Sports Physiology and Performance
© 2018 Human Kinetics, Inc.

Mechanisms of performance improvements due to a leading teammate during uphill cycling

Original investigation

Theo Ouvrard¹, Alain Gros Lambert¹, Gilles Ravier¹, Sidney Grosprêtre¹, Philippe Gimenez¹, & Frederic Grappe^{1,2}

Affiliations:

¹ EA4660, C3S Health - Sport Department, Sports University, Besançon, France

² Professional Cycling Team FDJ, Moussy le Vieux, France

Corresponding author:

Theo Ouvrard

University of Franche-Comte

Culture – Sport – Health – Society (C3S), Health & Sport Department

UPFR Sports

31 chemin de l'épître

25000 Besançon

France

Tel.: +33/633/503 850

Fax: +33/384/537 838

ouvrard.to@gmail.com

Running Head: Teammate presence and uphill cycling performance

Abstract word count: 250

Text-only word count: 4120

Number of Figures: 3

Number of Tables: 2

"Mechanisms of Performance Improvements Due to a Leading Teammate During Uphill Cycling" by Ouvrard O et al.
International Journal of Sports Physiology and Performance
© 2018 Human Kinetics, Inc.

Abstract

Purpose: This study aimed to identify the impact of a leading teammate in front of a cyclist on psychological, physiological, biomechanical and performance parameters during an uphill maximal effort. **Methods:** After familiarisation, twelve well-trained competitive cyclists completed two uphill time-trials (UTTs, 2.7 km at 7.4 %) in randomised order: one performed alone (control condition), and one following a simulated teammate during the entire UTT (leader condition). Performance (UTT time) and mean power output (PO) were recorded for each UTT. For physiological parameters, mean heart rate and post-exercise blood lactate concentration were recorded. Psychological parameters (rating of perceived exertion, pleasure and attentional focus) were collected at the end of each trial. **Results:** Performance (UTT time) significantly improved by $4.2 \pm 3.1\%$ in the leader condition, mainly due to drafting decrease of the aerodynamic drag (58% of total performance gains) and higher end-spurt ($+9.1 \pm 9.1\%$ of mean PO in the last 10% of the UTT). However, heart rate and post-exercise blood lactate concentration were not significantly different between conditions. From a psychological aspect, higher pleasure was observed in leader condition ($+41.1 \pm 51.7\%$), but attentional focus was not significantly different. **Conclusions:** The presence of a leading teammate during uphill cycling had a strong impact on performance, allowing higher speed for the same mean PO and greater end-spurt. These results explain why the best teams competing for the general classification of the most prestigious and contested races like the Grand Tours tends to always protect their leader with teammates during decisive ascents.

Keywords: Power output, Rating of Perceived Exertion, Attentional focus, Aerodynamic drag, Pacing strategy, Climber.

"Mechanisms of Performance Improvements Due to a Leading Teammate During Uphill Cycling" by Ouvrard O et al.
International Journal of Sports Physiology and Performance
© 2018 Human Kinetics, Inc.

Introduction

Since the early 2000s, due to the team tactics in modern cycling, the progress of the main climbs during the mountain stages of major cycling races has followed a typical pattern. From the beginning of the ascent, to impose a high pace, the teammates of the best teams always occupy positions at the front of the main group, with their leader directly behind them. While this strategy is now well established and used automatically by all teams seeking final victory during a Grand Tour, its impact on the main determinants of performance has not been studied yet.

The reduction in aerodynamic drag and resistive force when a leader follows a teammate (drafting effect) would represent the main biomechanical benefit of cycling performance.¹ However, the biomechanical equations of motion demonstrate that, when cycling uphill, most of the resistive force is due to gravitational resistance.^{2,3} One previous study even suggested that for gradients higher than 7.2%, the impact of speed, and therefore of air resistance, on energy expenditure can be neglected.⁴ If the impact of drafting effect on uphill cycling performance has never been studied yet, these results suggest that the presence of a leading teammate during a climb has only a minor impact on biomechanical determinants of performance.

Conversely, it might be expected that the presence of a teammate in front of a leader during a climb would have a significant impact on the psychological determinants of performance. Indeed, several recent studies have demonstrated that the cyclist's environment, and more especially the presence of other athletes, directly alters the athlete's thoughts and improves performance.⁵⁻⁷ Brick *et al.*^{8,9} explained that the presence of external clues for pace regulation increases 'outward monitoring' and 'active self-regulation' of performance and decreases 'internal sensory monitoring' of negative bodily sensations. By focusing on external elements salient to performance (such as a leading teammate), the cyclists still receive

"Mechanisms of Performance Improvements Due to a Leading Teammate During Uphill Cycling" by Ouvrard O et al.
International Journal of Sports Physiology and Performance
© 2018 Human Kinetics, Inc.

information to optimally regulate their pace but are also distracted from their perceived exertion and can therefore sustain higher exercise intensities. This new knowledge about attentional focus is also in line with recent psychophysiological models of endurance performance¹⁰⁻¹² which show that the athlete's effort is directly influenced by psychological factors that are likely to increase or reduce perceived exertion during the task.

Finally, according to athletes and coaches in the field, one of the main objectives of imposing a high pace in this way during a climb is to protect the team leaders from opponents' attacks. Thus, this helps them to remain continuously at the highest exercise intensity they can sustain throughout the ascent. Indeed, numerous studies have shown that hilly time-trial performance can be improved by increasing PO in uphill and decreasing PO in downhill.¹³⁻¹⁸ However, it has been demonstrated that for long-duration cycling under constant environmental conditions, as during a regular gradient climb, maintaining a constant PO is the most efficient pacing strategy to improve performance.^{15,18-21} Poor adherence to a constant speed, induced by increasing amplitude and period of PO variations, was related to performance losses,^{18,21} which can be explained by increase of biomechanical losses and fatigue.^{14,16,19} A leading teammate can therefore have a significant impact on leader's performance by reducing all undesired changes of speed and maintaining a linear optimal pace throughout the climb.

Several of the mechanisms driving performance can be influenced by the presence of a leading teammate during a climb. However, even if these different mechanisms were analysed separately in laboratory, the true impact of this strategy on genuine field performance has not been studied yet and remains unknown. The aim of the present study was to determine the effect of a leading teammate on field maximal uphill cycling performance. We hypothesised that the presence of a leading teammate would increase the exercise intensity tolerated by a cyclist and improve performance by modifying attentional focus and reducing exercise intensity variations.

"Mechanisms of Performance Improvements Due to a Leading Teammate During Uphill Cycling" by Ouvrard O et al.
International Journal of Sports Physiology and Performance
© 2018 Human Kinetics, Inc.

Methods

Participants

Twelve male competitive cyclists (mean age, height, body mass and maximal aerobic power were, respectively, 23.0 ± 3.7 years, 178.9 ± 6.7 cm, 68.3 ± 5.2 kg and 5.8 ± 0.6 W·kg⁻¹) volunteered to take part in this study. All had participated in cycling races for at least three years prior to the study, and can be classified as "well-trained" according to De Pauw *et al.*²² Prior to participating in the study, each participant provided written informed consent in accordance with the ethical principles of the Declaration of Helsinki and approved by the institutional ethics committee.

Study design

The study comprised three sessions, each involving an uphill time-trial (UTT) on the same 2.7 km course (mean slope of $7.4 \pm 1.2\%$, Figure 1) performed on the participant's personal bicycle (7.1 ± 0.2 kg). Prior to each UTT, participants performed a standardised warm-up comprising 10 minutes of cycling at moderate intensity (rating of perceived exertion (RPE) of 3 on Borg's CR-10 scale²³) on a turbo home-trainer (CatEye cyclosimulator CS-1000, CatEye, Osaka, Japan), followed by 5 minutes of passive recovery. Bicycle tyres were systematically inflated to 800 kPa of pressure to provide similar rolling resistance for each session. The total mass of participant plus bicycle and equipment was also controlled at the end of the warm-up to ensure similar gravitational resistance for each UTT.

Experimental conditions

As a familiarisation session, the initial UTT was performed alone. The two subsequent sessions consisted of two UTTs, performed in leader or control condition. In order to avoid the effect of pacing strategy recalculation due to successive time-trials^{24,25}, the order of leader and control conditions sessions were randomised. For the leader condition, participants completed the UTT accompanied by a domestic teammate, simulated by an experimenter using an

"Mechanisms of Performance Improvements Due to a Leading Teammate During Uphill Cycling" by Ouvrard O et al.
International Journal of Sports Physiology and Performance
© 2018 Human Kinetics, Inc.

electrically assisted bicycle (Overvolt Speed, Lapierre, Dijon, France). Participants were told that the simulated teammate would remain ahead of them for the entire UTT, initially replicating their own speed as recorded during the familiarisation session and then adjusting the pace to every instruction they gave verbally. In order to facilitate the control of the teammate speed, participants were instructed that the leading teammate will increase his speed by $0.2 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ each time they say "Go". Similarly, they were instructed that the leading teammate will reduce his speed by $0.2 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ each time they say "Wait". Finally, participants were also instructed that the leading teammate will slow down without instruction if a gap greater than 2 meters appeared between the two bikes. To simulate as accurately as possible the behaviour of a real teammate during an official race, the experimenter chosen for this teammate role was an experienced competitive cyclist, who was used to being a domestic teammate during official amateur cycling races (age, height, body mass and maximal aerobic power, 25.0 years, 182.0 cm, 71.5 kg and $5.3 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively). Furthermore, the electrically assisted bicycle was put in moderate motor-assisted mode (adding a continuous 150 W to the effort of the pedalling cyclist). This ensured that the experimenter could maintain the participant's desired speed without any restriction due to his own physical capacities, and all pace adjustments involved increasing or reducing effort and pedalling rate, as performed by actual cycling teammates in the field. The control UTT was performed alone by the participants, as a classic field time-trial test. Independently from the conditions, participants were instructed to complete the UTTs as in race conditions, with a self-selected pacing strategy to achieve the shortest UTT time, and to freely choose and change their position on the bicycle during the entire UTT. All the participants chose to alternate seated and standing position and to remain with their hands on the brake hoods and/or on the top of the handlebars. The two sessions were completed at the same time of day (± 2 hours), separated by 48 hours of complete recovery. Participants refrained from any strenuous exercise and excessive caffeine, or alcohol

"Mechanisms of Performance Improvements Due to a Leading Teammate During Uphill Cycling" by Ouvrard O et al.
International Journal of Sports Physiology and Performance
© 2018 Human Kinetics, Inc.

consumption in the preceding 24-hour period, and refrained from food consumption in the two hours before each session. Atmospheric conditions were also controlled and remained stable for the two UTTs (averaging $19.5 \pm 5.4^{\circ}\text{C}$, 1016 ± 5 hpa of atmospheric pressure, and 58.3 ± 11.9 % of relative humidity).

Exercise intensity measurement

Participants performed each UTT on their personal bicycle, fitted with a Powertap Pro+ power meter (Saris Cycling Group, Madison, USA). For each session, the power meter was zeroed in accordance with the manufacturer's instructions, to ensure valid and accurate measurement.²⁶ Throughout the UTTs, power output (W) and heart rate (bpm) were recorded continuously at a frequency of 1 Hz using a Garmin Edge 800 device (Olathe, USA). Three minutes after the end of the exercise, 5 μ L capillary blood samples were drawn from an earlobe to determine post-exercise blood lactate concentration using a portable analyser (Lactate Pro 2, Arkray Inc., Tokyo, Japan).

Assessment of psychological parameters

Immediately at the end of each session, participants were asked to quantify on the CR-10 scale²³ their mean RPE and pleasure during the UTT as proposed by Baron *et al.*¹² Their different levels of motivation (intrinsic motivation, identified regulation, external regulation and amotivation) were also assessed using the Situational Motivation Scale.²⁷ Finally, attentional focus and thought management were recorded immediately after the UTTs using a subjective questionnaire. The questionnaire asked participants to quantify their relative parts of thoughts related to 1) their internal sensory monitoring of effort (e.g. thoughts related to their breathing, muscle soreness, fatigue...), 2) their active self-regulation of the task (technique, cadence, pacing strategy...), 3) their outward monitoring of the exercise (other competitors, split times, road characteristics...), 4) active distractions (i.e. intentional distraction) and 5) involuntary distractions (attractive environment and unimportant scenery)

"Mechanisms of Performance Improvements Due to a Leading Teammate During Uphill Cycling" by Ouvrard O et al.
International Journal of Sports Physiology and Performance
© 2018 Human Kinetics, Inc.

expressed as a relative percentage of the total UTT thoughts. This method was based on the recommendations of Brick *et al.*⁸ for analysing attentional focus during sports performance and was similar to the method used in a previous study.⁹

Data analysis

Pacing strategies were quantified by calculating mean PO for each 10% section of the total UTT time for each participant in each condition. To further investigate exercise intensity regulation mechanisms, raw PO data were analysed using the Exposure Variation Analysis (EVA) method²⁸ from a customised Excel spreadsheet (Microsoft, Redmond, USA). As described in previous studies,^{29,30} this method quantifies PO fluctuations' duration and amplitude as an expression of the overall time-trial time. To process this, seven exercise intensity zones were calculated for each participant from UTT mean PO ($\leq 89.9\%$; 90 to 93.9%; 94 to 97.9%; 98 to 101.9%; 102 to 105.9%; 106 to 109.9%; $\geq 110\%$). The total amount of time spent within each zone was recorded. In addition, the period for which PO was maintained in each intensity zone, without changing to another one, was also quantified and ranged from: 0 to 2s; over 2 to 5 s; over 5 to 10 s; over 10 to 30 s; over 30 s. Thus, the time spent inside each intensity and time zone was expressed into an EVA matrix (e.g. Table 1) for each cyclist. Then, to facilitate exercise intensity regulation interpretations, times spent inside the different zones were summed for each of the three types of effort regulation observed during a self-paced time-trial : 1) when the cyclist maintains accurate exercise intensity for the optimal constant pacing strategy (APO; PO values between 90% and 110% of mean PO), 2) when the cyclist maintains an inappropriate exercise intensity for the optimal constant pacing strategy over a long period of time (IPO; PO $<90\%$ or $>110\%$ of mean PO for more than 10 s continuously) and 3) when the cyclist performs short-time regulation to avoid prolonged effort at inappropriate exercise intensity (REG; PO $<90\%$ or $>110\%$ of mean PO for less than 10 s continuously). The PO and duration thresholds of APO, IPO and REG parameters were determined from preliminary

"Mechanisms of Performance Improvements Due to a Leading Teammate During Uphill Cycling" by Ouvrard O et al.
International Journal of Sports Physiology and Performance
© 2018 Human Kinetics, Inc.

experiments, which allowed us to determine that these limits were optimal to discriminate athletes using optimal constant pacing strategy and athletes who are unable to maintain this constant pacing strategy.

Finally, performance gains in leader condition due to reduced aerodynamic drag were estimated using the biomechanical equations of motion of the cyclist.^{2,3} First, total resistive forces (R_t , in N) were calculated in both conditions using the formula:

$$R_t = PO \cdot V^{-1}$$

Where PO is mean power output (W) and V is mean speed ($m \cdot s^{-1}$). As total mass of cyclist and bicycle and tyre pressure were controlled in both conditions to ensure similar rolling and gravitational resistances, the difference in R_t between the conditions was attributed to a decrease of aerodynamic drag due to the drafting effect in leader condition. Second, a newly hypothesised 'without drafting' leader condition mean speed ($V_{\text{leader/drafting}}$, $m \cdot s^{-1}$) was calculated using the formula:

$$V_{\text{leader/drafting}} = PO_{\text{leader}} \cdot R_{t\text{control}}^{-1}$$

Where PO_{leader} is mean power output in leader condition (W), and $R_{t\text{control}}$ is total resistive forces in control condition (N). In this way, performance gains due to reduced aerodynamic drag in leader condition were determined as the difference between control condition performance and the estimated time for completion of the UTT distance at $V_{\text{leader/drafting}}$.

Statistical analysis

Descriptive statistics were computed and all data were expressed as mean $\pm$ standard deviation, with 95% confidence intervals (95% CI). The Shapiro-Wilk test was used to verify the Gaussian distribution of all results. As the data were normally distributed, the effect of

"Mechanisms of Performance Improvements Due to a Leading Teammate During Uphill Cycling" by Ouvrard O et al.
International Journal of Sports Physiology and Performance
© 2018 Human Kinetics, Inc.

condition (leader vs control) on UTT performance (in seconds), exercise intensity parameters (mean PO, mean heart rate, and post-exercise blood lactate concentration), psychological parameters (RPE, pleasure, intrinsic motivation, identified regulation, external regulation, amotivation, and percentages of thoughts related to internal sensory monitoring, active self-regulation, outward monitoring, active distractions and involuntary distractions), Rt and times spent at APO, IPO and REG was analysed using pairwise t-tests. Complementally, magnitude of the difference between conditions was interpreting using Cohen's d^{31} effect-size where <0.2 is trivial, 0.2 to 0.6 is small, 0.6 to 1.2 is moderate, 1.2 to 2.0 is large and >2.0 is very large.³² Conversely, as the Shapiro-Wilk test revealed that the mean PO for each 10% section were not normally distributed, comparison of mean PO for each 10% section of leader and control conditions were performed with separated Wilcoxon signed rank tests. Magnitude of differences was assessed using appropriate effect-size calculated according to Pallant.³³ Statistical analyses were performed using SigmaPlot 12.0 software (Systat Inc. San Jose, USA). The level of statistical significance was set at $p < 0.05$.

Results

All recorded variables for both conditions are detailed in Table 2. Performance (UTT time) was significantly improved from leader to control condition by 23 ± 22 sec (95% CI = 35 to 11) or $4.2 \pm 3.1\%$ (95% CI = 6.0% to 2.4%, effect-size = 0.47, $p = 0.002$, Figure 2). Conversely, no significant condition effect was observed on mean PO (Figure 2), mean heart rate, post-exercise blood lactate concentration or RPE. Consequently, the performance gains can be mainly explained by the significant reduction of total resistive force in leader condition due to the drafting effect ($-2.3 \pm 2.3\%$, 95% CI = -1.6% to -3.6%, effect-size = 0.28, $p = 0.01$), which can explain 13 ± 26 sec (95% CI = 0 to 27.7) or 57.8% ($V_{\text{leader/drafting}} = 18.4 \pm 1.5 \text{ km.h}^{-1}$ vs $18.8 \pm 1.6 \text{ km.h}^{-1}$ for the mean speed in leader condition) of the total performance gains. Time spent at REG increased significantly in leader condition as compared to control ($+29.3 \pm$

"Mechanisms of Performance Improvements Due to a Leading Teammate During Uphill Cycling" by Ouvrard O et al.
International Journal of Sports Physiology and Performance
© 2018 Human Kinetics, Inc.

29.9%, 95% CI = +12.4% to +46.2%, effect-size = 0.79, $p = 0.02$), while there was a trend of a decrease of time spent at APO ($-9.6 \pm 18.6\%$, 95% CI = -20.1% to +0.9%, effect-size = -0.62, $p = 0.09$). There was no significant difference in motivation levels or attentional focus categories between conditions; however a significantly higher pleasure was observed in leader condition as compared to control ($+41.1 \pm 51.7\%$, 95% CI = +11.8% to +70.4%, effect-size = 0.76, $p = 0.008$).

PO did not differ significantly between conditions from 0 to 90 % of UTT time. Inversely, PO values were significantly higher in leader condition compared to control from 90 to 100% of UTT ($+32 \pm 32$ W, 95% CI = +14 to +50, or $+9.1 \pm 9.1\%$, 95% CI = +4.0% to 14.2%, effect-size = 0.45, $p = 0.03$) (Figure 3).

Discussion

In modern cycling, teammates' work is now systematically used by the best teams to protect their leaders during mountain pass ascents. The most important finding of this ecological study is that this strategy significantly improves genuine cycling performance during UTT in the field.

Our results show that UTT performance can be increased by $4.2 \pm 3.1\%$ (effect-size = 0.47, $p = 0.002$) in the presence of a teammate. These performance gains are comparable to those observed after specific training programmes (generally lower than 4%^{34,35}), consumption of ergogenic substances (i.e. caffeine or energy drinks, from 2.8 to 6.5 %^{36,37}) or psychological interventions (e.g. motivational self-talk, 3.8%³⁸). These gains can be considered large when compared to the very low between-participants variability of performance between top-8 contenders during a Grand Tour like the Tour de France (ranged from 0.7% for the final general classification to 2.2% for the time-trial stages³⁹). This sizeable impact on performance clearly suggests that it may no longer be possible for any professional cyclist to win a Grand Tour

"Mechanisms of Performance Improvements Due to a Leading Teammate During Uphill Cycling" by Ouvrard O et al.
International Journal of Sports Physiology and Performance
© 2018 Human Kinetics, Inc.

without using this strategy and explains why the best teams always employ this approach during decisive climbs.

These gains appear to be mainly related to reduced aerodynamic drag ($-2.3 \pm 2.3\%$) due to the drafting effect behind the leading teammate. Indeed, according to the equations of motion of the cyclist, 57.8% of performance gains (-13 ± 26 sec) can be attributed to the reduction of resistive forces. This study is the first to demonstrate that the drafting effect has such an impact on uphill cycling performance. Often neglected in the past,⁴ this factor seems to be the main reason why performance can be improved in presence of a leading teammate even in uphill cycling.

Conversely, the presence of the teammate did not significantly increase the exercise intensity (mean PO, heart rate or post-exercise blood lactate concentration) sustained by the participating cyclists. These results are inconsistent with previous studies,⁵⁻⁷ which demonstrated that the presence of another competitor improved mean PO during laboratory time-trials. These contradictory results can be explained by the fact that these previous studies were conducted in competitive situations with another cyclist, whereas our leader condition rather implies a cooperative situation. However, the cooperative presence of another cyclist, as for a teammate work during uphill cycling, has not been studied yet. This dissimilarity seems to induce a different impact on the cyclists attentional focus, which can explain why the participants did not significantly increase their mean PO in leader condition in our study. Indeed, several authors have argued that athletes' tolerance for increased exercise intensity is due to a decrease in internal sensory monitoring, leading to a decrease in RPE for the same mean PO.^{5-7,9} As participants' attentional focus did not significantly differ between conditions in our study, this result explains why mean PO was not significantly increased in the presence of the leading teammate.

"Mechanisms of Performance Improvements Due to a Leading Teammate During Uphill Cycling" by Ouvrard O et al.
International Journal of Sports Physiology and Performance
© 2018 Human Kinetics, Inc.

These contradictory results about attentional focus alterations due to another athlete's presence can also be explained by the different context of the exercise. Indeed, previous studies⁵⁻⁷ analysed the impact of other competitors' presence during laboratory time-trials, and it can be hypothesised that this extremely standardised and neutral environment provided very limited sources of distraction, which mean that athletes were constrained to focus mainly on internal sensory monitoring of their bodily sensations. Adding a new source of distraction, such as a competitor's presence, is therefore likely to have a major impact on attentional focus and RPE. In contrast, our study was conducted under field conditions, which initially provided several sources of distraction for the athlete (road course, landscape background etc.). In this context, the addition of another athlete represents less of a change in environmental condition. These major differences between laboratory and field environments can also explain the reduced impact of other athletes' presence on attentional focus and mean PO in field conditions.

Finally, while no significant differences in mean PO were observed between conditions from 0 to 90% of the UTT, instantaneous regulation of exercise intensity was significantly altered by the presence of the leading cyclist. Indeed, the results of the EVA analysis demonstrate that participants performed more short adjustments of exercise intensity (REG, $+29.3 \pm 29.9\%$, effect-size = 0.79, $p = 0.02$) and spent less time at constant average intensity (APO, $-9.6 \pm 18.6\%$, effect-size = -0.62, $p = 0.09$) in leader condition. These results suggest that the different mental approach of the effort in leader condition, for which the cyclist manages the effort based on the pace of the leading teammate, induced different central pace control mechanisms⁴⁰ with more regular changes of exercise intensity throughout exercise. According to previous studies, these more numerous PO variations are detrimental for performance during time-trial under constant environmental conditions,^{15,18-21} especially for gradient higher than 6%,¹⁸ increasing biomechanical losses and fatigue.^{14,16,19} These results can therefore also explain why participants did not significantly improve their PO between 0 and

"Mechanisms of Performance Improvements Due to a Leading Teammate During Uphill Cycling" by Ouvrard O et al.
International Journal of Sports Physiology and Performance
© 2018 Human Kinetics, Inc.

90% of UTT in leader condition compared to control condition. Conversely, a significantly higher end-spurt was observed in leader condition ($+9.1 \pm 9.1\%$ of mean PO in the last 10% of the UTT, effect-size = 0.45, $p = 0.03$, Figure 3). These results are in accordance with previous studies which demonstrate that the main component of PO gain in the presence of another competitor occurs at the beginning or towards the end of the trials⁵⁻⁷. Regarding the results of this study, this higher-end-spurt behind the leading teammate seems to relate to changes of psychological state during the UTT. Indeed, a significant increase of pleasure was observed in leader condition as compared to control ($+41.1 \pm 51.7\%$, effect-size = 0.76, $p = 0.008$). According to recent psychophysiological models of endurance exercise,¹⁰⁻¹² pleasure and positive affects are extremely important for performance, allowing the athlete to sustain higher exercise intensity. Marcora and Staiano¹⁰ explained that the increase in positive psychological parameters such as motivation and/or pleasure is responsible for the end-spurt increase in PO in the last 10% of exercise. When the athlete knows that the remaining exercise time is reduced, positive affects increase, allowing him to sustain higher exercise intensity. It follows that the more the athlete's pleasure increases, the more he will be able to increase PO for this end-spurt. Our results suggest that this phenomenon is the main psychological effect influencing performance in presence of a leading teammate during an UTT, increasing positive affects during the entire UTT and allowing a greater increase of exercise intensity towards the finish line. This increasing end-spurt in leader condition may also be attributed to the social facilitation effect, as described by Zajonc.^{41,42} This theory supports that, in the presence of others, activation, and consequently performance for simple task as physical activity, is improved. However, as social facilitation was not evaluated in this study, its impact on the UTT performance in leader condition cannot be proved. It could be interesting for future studies to further analyse the discourses of the athletes in order to better understand the deeper

"Mechanisms of Performance Improvements Due to a Leading Teammate During Uphill Cycling" by Ouvrard O et al.
International Journal of Sports Physiology and Performance
© 2018 Human Kinetics, Inc.

psychological mechanisms involved behind the end-spurt and performance improvements in the presence of a leading teammate.

Practical applications

Uphill cycling performance can be improved thanks to the presence of a leading teammate. These results extend knowledge about competitive cycling performance and explain why the best teams always now deploy teammates to protect their leader during climbs in the most prestigious and contested races such as Grand Tours. As the first study to analyse the impact of a leading teammate on uphill cycling performance, this work has several limitations. Most importantly, the participants of this study were non-professional cyclists, and were not used to benefiting from this kind of strategy. It can be expected that Grand Tour champions, who are more used to following a teammate's tempo, have specific psychological or pacing capacities that can help them to increase their performance more significantly in this condition. It would be interesting for future studies to analyse the impact of teammate presence on performance in that specific population.

Conclusions

In modern cycling, the best teams always use teammates to protect their leaders during the main climbs of decisive mountain stages. This ecological study is the first to show that this strategy can significantly improve uphill cycling performance, mainly due to aerodynamic gains and psychological changes allowing the cyclist to produce a higher end-spurt in the final meters of the ascent. These results highlight the need to analyse sport performance and, more especially elite performance by using holistic models encompassing all relevant scientific fields. As differences of performance between first placed cyclists in world-class competitions are extremely narrow, even minor performance determinants such as drafting effect or end-spurt during UTT can have a sizeable impact on the final result and should not be neglected.

"Mechanisms of Performance Improvements Due to a Leading Teammate During Uphill Cycling" by Ouvrard O et al.
International Journal of Sports Physiology and Performance
© 2018 Human Kinetics, Inc.

Acknowledgments

The authors wish to thank the participating cyclists for their cooperation, Rémi Gribaudo and the Lapierre company for the free loan of the electrically-assisted bicycle. This research was not supported by external funding. The authors declare no conflict of interest. The results of the current study do not constitute endorsement of the product by the authors or the journal.

"Mechanisms of Performance Improvements Due to a Leading Teammate During Uphill Cycling" by Ouvrard O et al.
International Journal of Sports Physiology and Performance
© 2018 Human Kinetics, Inc.

References

1. Kyle CR. Reduction of wind resistance and power output of racing cyclists and runners travelling in groups. *Ergonomics*. 1979;22(4):387-397.
2. Martin JC, Milliken DL, Cobb JE, McFadden KL, Coggan AR. Validation of a Mathematical Model for Road Cycling Power. *J Appl Biomech*. 1998;14(3):276-291.
3. Millet GP, Tronche C, Grappe F. Accuracy of indirect estimation of power output from uphill performance in cycling. *Int J Sports Physiol Perform*. 2014;9(5):777-782.
4. Mognoni P, Di Prampero PE. Gear, inertial work and road slopes as determinants of biomechanics in cycling. *Eur J Appl Physiol*. 2003;90(3-4):372-376.
5. Corbett J, Barwood MJ, Ouzounoglou A, Thelwell R, Dicks M. Influence of competition on performance and pacing during cycling exercise. *Med Sci Sports Exerc*. 2012;44(3):509-515.
6. Williams EL, Jones HS, Sparks SA, Marchant DC, Midgley AW, Mc Naughton LR. Competitor presence reduces internal attentional focus and improves 16.1 km cycling time trial performance. *J Sci Med Sport*. 2015;18(4):486-491.
7. Konings MJ, Parkinson J, Zijdwind I, Hettinga FJ. Racing an Opponent Alters Pacing, Performance and Muscle Force Decline, But Not RPE. *Int J Sports Physiol Perform*. 2017;1-24.
8. Brick NE, MacIntyre TE, Campbell MJ. Attentional focus in endurance activity: new paradigms and future directions. *Int Rev Sport Exerc Psychol*. 2014;7(1):106-134.
9. Brick NE, Campbell MJ, Metcalfe RS, Mair JL, Macintyre TE. Altering Pace Control and Pace Regulation: Attentional Focus Effects during Running. *Med Sci Sports Exerc*. 2016;48(5):879-886.
10. Marcora SM, Staiano W. The limit to exercise tolerance in humans: mind over muscle? *Eur J Appl Physiol*. 2010;109(4):763-770.
11. Tucker R. The anticipatory regulation of performance: the physiological basis for pacing strategies and the development of a perception-based model for exercise performance. *Br J Sports Med*. 2009;43(6):392-400.
12. 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):511-517.
13. Atkinson G, Peacock O, Passfield L. Variable versus constant power strategies during cycling time-trials: prediction of time savings using an up-to-date mathematical model. *J Sports Sci*. 2007;25(9):1001-1009.
14. Atkinson G, Peacock O, Law M. Acceptability of power variation during a simulated hilly time trial. *Int J Sports Med*. 2007;28(2):157-163.
15. Atkinson G, Brunskill A. Pacing strategies during a cycling time trial with simulated headwinds and tailwinds. *Ergonomics*. 2000;43(10):1449-1460.

"Mechanisms of Performance Improvements Due to a Leading Teammate During Uphill Cycling" by Ouvrard O et al.
International Journal of Sports Physiology and Performance
 © 2018 Human Kinetics, Inc.

16. Swain DP. A model for optimizing cycling performance by varying power on hills and in wind. *Med Sci Sports Exerc.* 1997;29(8):1104-1108.
17. Cangle P, Passfield L, Carter H, Bailey M. The effect of variable gradients on pacing in cycling time-trials. *Int J Sports Med.* 2011;32(2):132-136.
18. Wells MS, Marwood S. Effects of power variation on cycle performance during simulated hilly time-trials. *Eur J Sport Sci.* 2016;16(8):912-918.
19. Abbiss CR, Laursen PB. Describing and understanding pacing strategies during athletic competition. *Sports Med.* 2008;38(3):239-252.
20. Foster C, Snyder AC, Thompson NN, Green MA, Foley M, Schrager M. Effect of pacing strategy on cycle time trial performance. *Med Sci Sports Exerc.* 1993;25(3):383-388.
21. Wells M, Atkinson G, Marwood S. Effects of magnitude and frequency of variations in external power output on simulated cycling time-trial performance. *J Sports Sci.* 2013;31(15):1639-1646.
22. De Pauw K, Roelands B, Cheung SS, de Geus B, Rietjens G, Meeusen R. Guidelines to classify subject groups in sport-science research. *Int J Sports Physiol Perform.* 2013;8(2):111-122.
23. Borg G, Ljunggren G, Ceci R. The increase of perceived exertion, aches and pain in the legs, heart rate and blood lactate during exercise on a bicycle ergometer. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1985;54(4):343-349.
24. de Koning JJ, Foster C, Bakkum A, et al. Regulation of pacing strategy during athletic competition. *PLoS One.* 2011;6(1):e15863.
25. Thomas K, Stone MR, Thompson KG, St Clair Gibson A, Ansley L. Reproducibility of pacing strategy during simulated 20-km cycling time trials in well-trained cyclists. *Eur J Appl Physiol.* 2012;112(1):223-229.
26. 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):1252-1258.
27. Guay F, Vallerand RJ, Blanchard C. On the assessment of situational intrinsic and extrinsic motivation: The Situational Motivation Scale (SIMS). *Motiv Emot.* 2000;24(3):175-213.
28. Abbiss CR, Straker L, Quod MJ, Martin DT, Laursen PB. Examining pacing profiles in elite female road cyclists using exposure variation analysis. *Br J Sports Med.* 2010;44(6):437-442.
29. Peiffer JJ, Abbiss CR. Influence of environmental temperature on 40 km cycling time-trial performance. *Int J Sports Physiol Perform.* 2011;6:208-220.
30. Ouvrard T, Pinot J, Gros Lambert A, Grappe F. Exposure Variation Analysis (EVA) method to monitor ability to optimally regulate exercise intensity of professional cyclists during official time-trial competition. *J Sci Cycling.* 2017;6(3):58-59.

"Mechanisms of Performance Improvements Due to a Leading Teammate During Uphill Cycling" by Ouvrard O et al.
International Journal of Sports Physiology and Performance
© 2018 Human Kinetics, Inc.

31. Cohen J. A power primer. *Psychol Bull.* 1992;112(1):155-159.
32. Hopkins WG. How to interpret changes in an athletic performance test. *Sportscience.* 2004;8(1):1-7.
33. Pallant J. SPSS survival manual, 3rd. *Edition McGrath Hill.* 2007.
34. Stepto NK, Hawley JA, Dennis SC, Hopkins WG. Effects of different interval-training programs on cycling time-trial performance. *Med Sci Sports Exerc.* 1999;31(5):736-741.
35. Capostagno B, Lambert MI, Lamberts RP. Standardized versus customized high-intensity training: effects on cycling performance. *Int J Sports Physiol Perform.* 2014;9(2):292-301.
36. McNaughton LR, Lovell RJ, Siegler J, Midgley AW, Moore L, Bentley DJ. The effects of caffeine ingestion on time trial cycling performance. *Int J Sports Physiol Perform.* 2008;3(2):157-163.
37. Quinlivan A, Irwin C, Grant GD, et al. The effects of Red Bull energy drink compared with caffeine on cycling time-trial performance. *Int J Sports Physiol Perform.* 2015;10(7):897-901.
38. Barwood MJ, Corbett J, Wagstaff CR, McVeigh D, Thelwell RC. Improvement of 10-km time-trial cycling with motivational self-talk compared with neutral self-talk. *Int J Sports Physiol Perform.* 2015;10(2):166-171.
39. Paton CD, Hopkins WG. Variation in performance of elite cyclists from race to race. *Eur J Sport Sci.* 2006;6(01):25-31.
40. St Clair Gibson A, Lambert EV, Rauch LH, et al. The role of information processing between the brain and peripheral physiological systems in pacing and perception of effort. *Sports Med.* 2006;36(8):705-722.
41. Zajonc RB. Social Facilitation. *Science.* 1965;149(3681):269-274.
42. Zajonc RB. Comprescence. In: Paulus PB, ed. *Psychology of group influence* Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates; 1980:35-60.

"Mechanisms of Performance Improvements Due to a Leading Teammate During Uphill Cycling" by Ouvrard O et al.
International Journal of Sports Physiology and Performance
 © 2018 Human Kinetics, Inc.

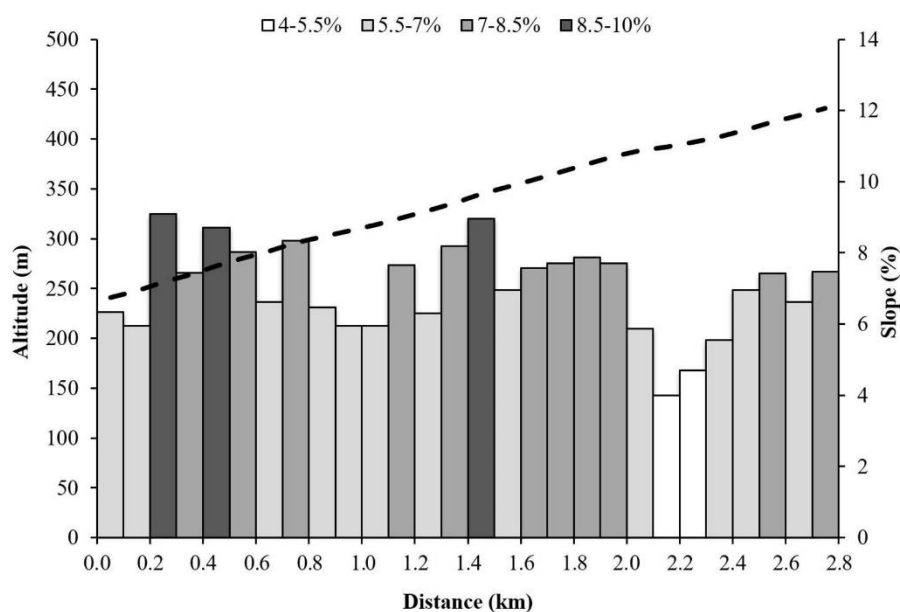


Figure 1: Altimetry and gradient of the Uphill Time-Trial (UTT0) course.

Altimetry (straight line and left axis) and slope (bars and right axis) are depicted in function of 100 m section of total UTT distance.

"Mechanisms of Performance Improvements Due to a Leading Teammate During Uphill Cycling" by Ouvrard O et al.
International Journal of Sports Physiology and Performance
© 2018 Human Kinetics, Inc.

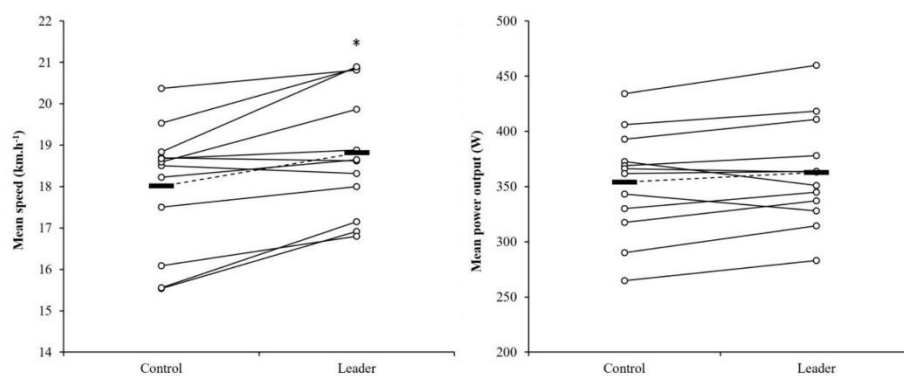


Figure 2: Mean (—) and intra-individual (°) differences in mean power output and mean speed between control and leader conditions (n=12).

*significantly different from control condition ($p < 0.01$)

"Mechanisms of Performance Improvements Due to a Leading Teammate During Uphill Cycling" by Ouvrard O et al.
International Journal of Sports Physiology and Performance
© 2018 Human Kinetics, Inc.

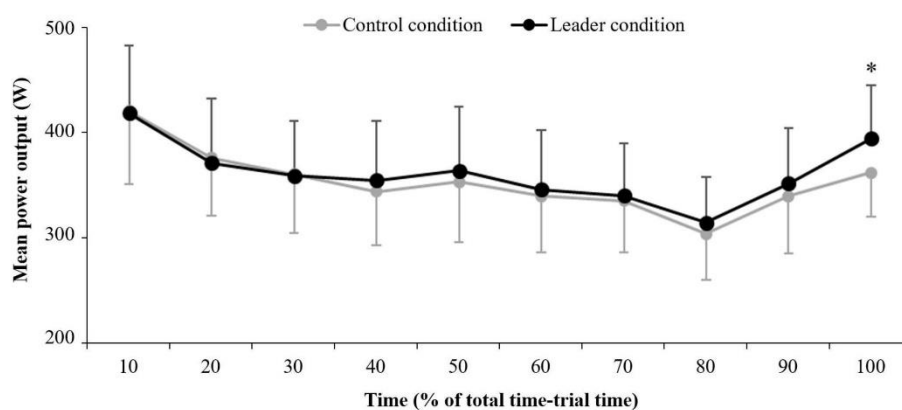


Figure 3: Evolution of power output during the uphill time-trial in leader and control conditions (n=12).

*significant difference between leader and control condition ($p < 0.05$)

“Mechanisms of Performance Improvements Due to a Leading Teammate During Uphill Cycling” by Ouvrard O et al.
International Journal of Sports Physiology and Performance
© 2018 Human Kinetics, Inc.

Table 1a. Mean percentage (%) of time spent in the different EVA zones for all the participants (n=12) during the UTT in leader condition.

Time zones	Intensity zones						
	< 89.9%	90-93.9%	94-97.9%	98-101.9%	102-105.9%	106-109.9%	> 110%
0 to 2 s	10.8 ± 4.1†	8.6 ± 2.1*	9.6 ± 1.9*	9.4 ± 2.8*	8.2 ± 2.0*	6.5 ± 1.2*	8.6 ± 3.5†
> 2 to 5 s	5.3 ± 3.2†	0.6 ± 0.6*	1.1 ± 0.8*	1.0 ± 0.8*	0.6 ± 1.0*	0.5 ± 0.9*	5.3 ± 3.3†
> 5 to 10 s	2.6 ± 1.9†	0.0 ± 0.0*	0.0 ± 0.0*	0.2 ± 0.5*	0.0 ± 0.0*	0.0 ± 0.0*	2.4 ± 2.2†
> 10 to 30 s	8.9 ± 2.9#	0.0 ± 0.0*	0.0 ± 0.0*	0.0 ± 0.0*	0.0 ± 0.0*	0.0 ± 0.0*	6.6 ± 1.4#
> 30 s	0.0 ± 0.0#	0.0 ± 0.0*	0.0 ± 0.0*	0.0 ± 0.0*	0.0 ± 0.0*	0.0 ± 0.0*	3.3 ± 2.4#

* Time comprised in accurate exercise intensity for the optimal constant pacing strategy zone (APO, 46.2%)

Time comprised in inappropriate exercise intensity for the optimal constant pacing strategy (IPO, 18.8%)

† Time comprised in short-time regulation to avoid prolonged effort at inappropriate intensity (REG, 35.0%)

Table 1b. Mean percentage (%) of time spent in the different EVA zones for all the participants (n=12) during the UTT in control condition

Time zones	Intensity zones						
	< 89.9%	90-93.9%	94-97.9%	98-101.9%	102-105.9%	106-109.9%	> 110%
0 to 2 s	9.2 ± 4.1†	8.9 ± 1.6*	9.6 ± 2.3*	10.5 ± 1.8*	9.1 ± 1.8*	6.4 ± 1.7*	8.1 ± 4.1†
> 2 to 5 s	4.3 ± 2.3†	1.6 ± 1.7*	1.3 ± 1.2*	2.1 ± 2.4*	1.3 ± 1.2*	1.0 ± 1.0*	3.4 ± 1.9†
> 5 to 10 s	2.2 ± 1.7†	0.0 ± 0.0*	0.2 ± 0.5*	0.0 ± 0.0*	0.0 ± 0.0*	0.0 ± 0.0*	1.6 ± 1.7†
> 10 to 30 s	7.4 ± 3.1#	0.0 ± 0.0*	0.0 ± 0.0*	0.0 ± 0.0*	0.0 ± 0.0*	0.0 ± 0.0*	5.1 ± 2.7#
> 30 s	0.0 ± 0.0#	0.0 ± 0.0*	0.0 ± 0.0*	0.0 ± 0.0*	0.0 ± 0.0*	0.0 ± 0.0*	6.9 ± 4.3#

* Time comprised in accurate exercise intensity for the optimal constant pacing strategy zone (APO, 52.0%)

Time comprised in inappropriate exercise intensity for the optimal constant pacing strategy (IPO, 19.4%)

† Time comprised in short-time regulation to avoid prolonged effort at inappropriate intensity (REG, 28.7%)

"Mechanisms of Performance Improvements Due to a Leading Teammate During Uphill Cycling" by Ouvrard O et al.
International Journal of Sports Physiology and Performance
 © 2018 Human Kinetics, Inc.

Table 2. Mean $\pm$ standard deviation values for performance, physiological, biomechanical and psychological variables in control and leader condition (n=12)

Variables	Control condition	Leader condition	Mean difference	Effect-size	p
UTT performance (min:sec)	09:05 $\pm$ 00:55	08:42 $\pm$ 00:45*	-23 $\pm$ 19 s	-0.47	0.002
Mean speed (km·h ⁻¹)	18.0 $\pm$ 1.7	18.8 $\pm$ 1.6*	+0.8 $\pm$ 0.6	0.47	0.001
Mean power output (W)	354 $\pm$ 49	363 $\pm$ 51	+9 $\pm$ 16	0.18	0.095
Total resistive force (N)	70.8 $\pm$ 5.8	69.2 $\pm$ 4.9*	-1.6 $\pm$ 1.5	0.31	0.007
Mean heart rate (bpm)	182 $\pm$ 6	181 $\pm$ 6	+1 $\pm$ 5	0.12	0.686
Lactate concentration (mmol·L ⁻¹)	11.4 $\pm$ 2.9	12.5 $\pm$ 2.1	+1.0 $\pm$ 2.7	0.41	0.397
RPE (/10)	8.1 $\pm$ 1.0	8.4 $\pm$ 1.0	+0.3 $\pm$ 1.1	0.33	0.379
Pleasure (/10)	3.3 $\pm$ 1.3	4.6 $\pm$ 1.8*	+1.3 $\pm$ 1.5	0.76	0.008
Levels of motivation					
Intrinsic motivation (/7)	5.2 $\pm$ 0.8	5.1 $\pm$ 0.6	-0.1 $\pm$ 0.2	-0.18	0.138
Identified motivation (/7)	5.5 $\pm$ 0.6	5.5 $\pm$ 0.9	-0.1 $\pm$ 0.4	-0.08	0.673
External regulation (/7)	2.8 $\pm$ 0.8	3.0 $\pm$ 1.3	+0.1 $\pm$ 0.7	0.12	0.596
Amotivation (/7)	1.2 $\pm$ 0.4	1.4 $\pm$ 0.6	+0.2 $\pm$ 0.4	0.37	0.191
Attentional focus					
Internal sensory monitoring (%)	26.2 $\pm$ 11.2	20.5 $\pm$ 11.9	-5.7 $\pm$ 12.1	-0.48	0.175
Active self-regulation (%)	28.3 $\pm$ 10.4	26.8 $\pm$ 12.8	-1.5 $\pm$ 17.2	-0.13	0.789
Outward monitoring (%)	22.3 $\pm$ 11.1	23.1 $\pm$ 12.5	+0.8 $\pm$ 14.0	0.07	0.861
Active distractions (%)	9.4 $\pm$ 9.7	17.1 $\pm$ 16.3	+7.7 $\pm$ 23.0	0.56	0.318
Involuntary distractions (%)	13.9 $\pm$ 15.5	12.5 $\pm$ 9.8	-1.4 $\pm$ 20.2	-0.11	0.820
Percentage of time from EVA analysis					
APO (%)	52.0 $\pm$ 9.5	46.2 $\pm$ 8.5	-5.8 $\pm$ 9.8	-0.62	0.089
IPO (%)	19.4 $\pm$ 7.6	18.8 $\pm$ 6.4	-0.5 $\pm$ 5.9	-0.07	0.790
REG (%)	28.7 $\pm$ 9.0	35.0 $\pm$ 5.6*	+6.3 $\pm$ 7.2	0.79	0.020

APO: accurate power output for optimal constant pacing strategy; IPO: inappropriate power output for optimal constant pacing strategy; REG: short-time regulation of inappropriate power output

* significantly different from control condition (p < 0.05)

CHAPITRE 6 : Utilisation de la méthode EVA pour le suivi de la performance et des mécanismes de régulation de l'effort lors de plusieurs contre-la-montre en cyclisme

1. Utilisation de la méthode EVA pour le suivi des performances lors de deux contre-la-montre réalisés sur des parcours identiques

Les résultats de cette étude ont fait l'objet d'une communication orale au congrès *Science and Cycling* (Ouvrard, Pinot, Gros Lambert et Grappe, Düsseldorf, 2017) : « Exposure Variation Analysis (EVA) method to monitor ability to optimally regulate exercise intensity of professional cyclists during time-trial competitions ». L'abstract de cette communication a ensuite été publié au sein de la revue *Journal of Science and Cycling*.

Résumé détaillé :

Exposure Variation Analysis (EVA) method to monitor ability to optimally regulate exercise intensity of professional cyclists during time-trial competitions

Ouvrard T., Pinot J., Gros Lambert A., et Grappe F.

Introduction :

Comme vu dans les chapitres précédents, les mécanismes de régulation de l'effort peuvent avoir une influence majeure sur la capacité du cycliste à exploiter au mieux ses qualités physiques en compétition. Les résultats de nos précédentes études montrent que l'analyse EVA et la quantification des temps passés à APO, IPO et REG peuvent se révéler extrêmement intéressantes afin d'évaluer cette capacité du cycliste à exploiter au maximum son potentiel physique en CLM. Cependant, aucune étude n'a encore montré que cette méthode pouvait être utilisée afin de suivre la capacité d'un même cycliste à réguler au mieux son effort et en conséquence à optimiser ses performances lors de plusieurs CLM. L'objectif de cette étude était donc d'étudier les relations entre les mécanismes de régulation de l'effort quantifiés à l'aide de

la méthode EVA et l'évolution des performances chez des cyclistes de niveau World-Tour lors de deux CLM en compétition officielle réalisés sur le même parcours. Nous avons émis l'hypothèse que l'augmentation du temps passé à IPO serait significativement reliée à la diminution des performances, en raison d'une plus grande fatigue et d'une augmentation des pertes biomécaniques dues aux variations de vitesse pour un même niveau de $P_{méca}$ moyenne. A l'inverse, l'augmentation du temps passé à APO illustrerait une meilleure régulation de l'effort sur l'ensemble du CLM, et serait significativement reliée à une amélioration des performances.

Méthodes :

Six cyclistes professionnels de niveau World-Tour ont participé à cette étude. Leurs $P_{méca}$ développées ont été recueillies lors de deux éditions de la même compétition CLM de niveau World-Tour (Tirreno-Adriatico, 2.WT1s), réalisée sur exactement le même parcours (10 km) deux années consécutives. Les conditions météorologiques lors des deux CLM étaient similaires, avec aucune précipitation et une température moyenne de $13,0 \pm 1,0$ °C. Les fluctuations de $P_{méca}$ ont été analysées pour ces deux CLM à l'aide de la méthode EVA telle que précédemment présentée. Cependant, en raison de la nature parfaitement plate et linéaire du parcours, présentant un seul virage sur l'ensemble du circuit, les zones d'intensité extrêmes délimitant les temps passé à APO et les temps passés à IPO ou REG ont été réduites à 95 et 105 % de la $P_{méca}$ moyenne développée, afin de permettre une plus grande sensibilité dans l'analyse. Les relations entre les évolutions des temps passés à APO, IPO ou REG et les évolutions de performance entre les deux CLM ont été analysées à l'aide de coefficients de corrélations de Pearson.

Résultats :

Les classements finaux lors des CLM étaient compris entre la 6^e et la 107^e place. Les $P_{méca}$ moyennes développées n'étaient pas significativement différentes entre les deux CLM (428 ± 17 W et 425 ± 12 W respectivement), et leurs évolutions n'étaient pas significativement reliées aux évolutions de performance entre les deux CLM. Cependant, une relation significative était observable entre l'augmentation du pourcentage de temps passé à APO et l'amélioration des performance (augmentation de la vitesse moyenne ; $r = 0,88$; $p < 0,05$; **Figure 31a**). Une tendance à la relation était également observable entre l'augmentation du pourcentage de temps passé à IPO et la diminution des performances ($r = -0,65$; $p = 0,15$; **Figure 31b**).

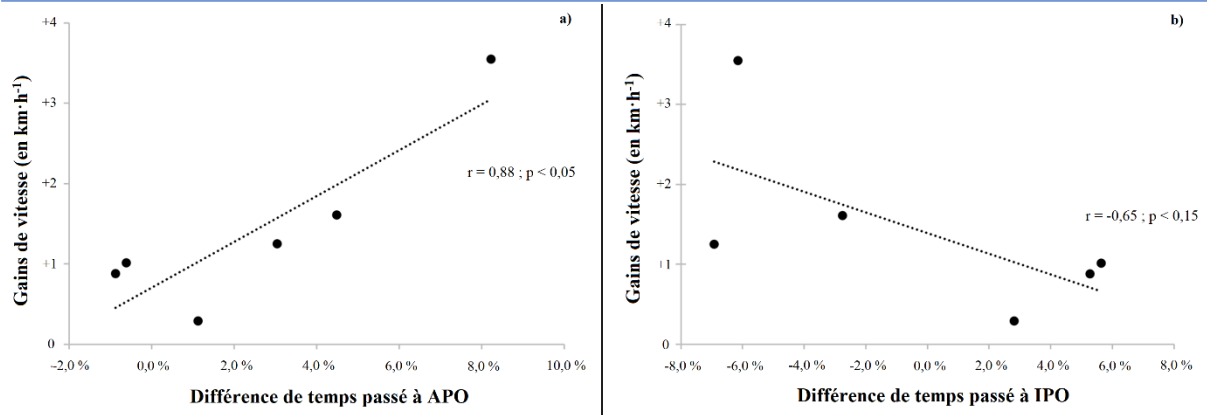


Figure 31. Relations entre les gains de vitesse entre les deux CLM et les évolutions des temps passés à APO (a) et IPO (b).

Discussion :

Il a été démontré que la performance en CLM était principalement dépendante de la $P_{méca}$ moyenne développée et du SCx du cycliste (Peterman *et coll.*, 2015). Cependant, nos résultats révèlent que l'analyse de la $P_{méca}$ moyenne est insuffisante pour prédire les différences de performance entre deux CLM de niveau World-Tour réalisés par le même athlète. A haut-niveau, les cyclistes doivent également assurer une utilisation optimale de cette $P_{méca}$ moyenne afin de réaliser une bonne performance. Cette utilisation optimale de la $P_{méca}$ moyenne implique notamment des mécanismes de régulation de l'intensité d'exercice adaptée, qui peut être mise en évidence à l'aide de la méthode EVA à partir d'une augmentation du temps passé à APO et une diminution de temps passé à IPO.

Conclusion et perspectives :

Il est extrêmement difficile pour un cycliste de niveau World-Tour d'améliorer ses qualités physiques déjà très développées avec l'entraînement. En conséquence, il serait extrêmement intéressant pour ce type d'athlète de haut-niveau d'optimiser ses mécanismes de régulation de l'intensité d'exercice afin d'améliorer encore davantage son niveau de performance. La méthode EVA semble être un outil innovant et intéressant pour évaluer et suivre cette capacité à réguler de manière optimale l'effort lors de deux CLM réalisés sur des parcours identiques.

Exposure Variation Analysis (EVA) method to monitor ability to optimally regulate exercise intensity of professional cyclists during time-trial competitions

Ouvrard, T.¹✉, Pinot, J.², Gros Lambert, A.¹, Grappe, F.^{1,2}

Introduction

Pacing strategies during endurance performance is becoming one of the main topics in sport sciences. Several studies proved that a constant pacing strategy, adjusted from course main difficulties, is optimal for individual time-trial (ITT) performance. However, the regulation mechanisms that allow athletes to maintain a constant power output (PO) remain poorly studied (Abbiss and Laursen 2008). The "Exposure Variation Analysis" (EVA) was recently proposed as a new innovative method to quantify short-time PO fluctuations during ITT (Abbiss et al. 2010; Peiffer and Abbiss 2011). This method appears to offer an interesting way to investigate the athlete ability to optimally regulate exercise intensity during ITT in order to maintain a constant optimal pacing strategy. The aim of this study was to assess the relationship between the exercise intensity regulation mechanisms quantified thanks to the EVA method and the evolutions of performance of World-Tour cyclists during an official competitive ITT performed on the same course during two consecutive years.

Methods

Six UCI World-Tour road cyclists took part in this study. Their PO were recorded during the same World-Tour ITT race performed on the exact same course (10 km) for two consecutive years. PO fluctuations were analysed from the EVA method to quantify time spent at an accurate PO for optimal constant pacing strategy (APO, PO between 95 and 105 % of mean ITT PO), time spent at an inaccurate PO for optimal constant pacing strategy (IPO, PO lower than 95 % or higher than 105 % of mean PO for more than 10 s) and short-time regulations of inaccurate PO (REG, PO lower than 95 % or higher than 105 % of mean PO for less than 10 s). Relationships between evolutions of times spent at APO, IPO or REG and evolution of performance (mean speed, kph) between the two ITT were assessed thanks to Pearson correlation coefficients.

Results

Final ranking ranged from 6th to 107th. Mean PO weren't significantly different between the two ITT (428 ± 17 and 425 ± 12 W respectively), and their variations weren't significantly related to the evolutions of performance between the two ITT. However, a significant relationship was identified between the evolution of performance and the difference of time spent at APO between the two ITT ($r = 0.88$, $p < 0.05$; figure 1). A trend of a decrease of performance with the increase of time spent at IPO was also identified ($r = -0.65$, $p = 0.15$; figure 2).

Discussion

It has been demonstrated that cycling ITT performance is mainly related to the mean PO / Effective frontal area ratio (Peterman et al. 2015). However, our results suggest that mean PO variations are insufficient to predict the performance changes between two World-Tour ITT performed by a same cyclist. At this elite level, cyclists must also provide an optimal use of their mean PO to achieve a good performance. This optimal use of the mean PO implies a good regulation of exercise intensity during the entire ITT, with an



increasing time spent at a constant optimal PO (APO) and reduced irregular efforts at a too high or too low PO (APO).

Conclusion

For a same ITT, mean PO of a professional cyclist remain extremely stable over years. Accordingly, he will be more able to improve his performance thanks to a better effort regulation than by increasing his mean PO. EVA method appears to be an innovative tool to evaluate cyclists' ability to optimally regulate exercise intensity during ITT.

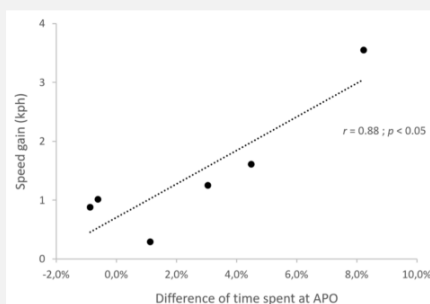


Figure 1: Relationship between variation of performance and evolution of time spent at optimal constant power output (APO) between two ITT on the same course

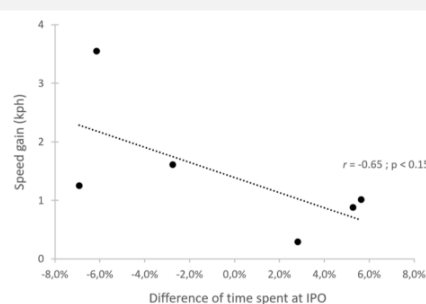


Figure 2: Relationship between variation of performance and evolution of time spent at inaccurate power output for optimal constant regulation (IPO) between two ITT on the same course

References

1. Abbiss CR, Laursen PB (2008) Describing and understanding pacing strategies during athletic competition. *Sports Med* 38: 239-252
2. Abbiss CR, Straker L, Quod MJ, Martin DT, Laursen PB (2010) Examining pacing profiles in elite female road cyclists using exposure variation analysis. *Br J Sports Med* 44: 437-442
3. Peiffer JJ, Abbiss CR (2011) Influence of environmental temperature on 40 km cycling time-trial performance. *Int J Sports Physiol Perf* 6: 208-220
4. Peterman JE, Lim AC, Ignatz RI, Edwards AG, Byrnes WC (2015) Field-measured drag area is a key correlate of level cycling time trial performance. *PeerJ* 3: e1144

Key words: Brain control, Pacing strategy, Power Output distribution, Time Trial Performance, Record Power Profile

✉Contact email: ouvrard.to@gmail.com (T Ouvard)

¹ EA4660, C3S Health - Sport Department, Sports University, Besancon, France

² Professional Cycling Team FDJ

2. Utilisation de la méthode EVA pour le suivi des capacités de régulation de l'effort lors de plusieurs contre-la-montre réalisés sur des parcours différents

Les résultats de cette étude ont fait l'objet d'une communication orale au congrès *Science and Cycling* (Ouvrard, Pinot, Gros Lambert et Grappe, Nantes, 2018) : « The new Exposure Variation Analysis (EVA) method to compare pacing strategy and performance during professional time-trial competitions ». L'abstract de cette communication a ensuite été soumis au sein de la revue *Journal of Science and Cycling* pour publication dans un numéro spécial.

Résumé détaillé :

The new Exposure Variation Analysis (EVA) method to compare pacing strategy and performance during professional time-trial competitions

Ouvrard T., Pinot J., Gros Lambert A., et Grappe F.

Notes : Ce résumé détaillé se base à la fois sur l'abstract présenté ci-après, ainsi que sur des éléments présentés uniquement à l'oral lors du congrès *Science and Cycling* 2018.

Introduction :

La précédente étude a permis de mettre en évidence que l'analyse EVA pouvait être utilisée pour suivre les mécanismes de régulation de l'effort de cyclistes lors de plusieurs CLM répétés. Une augmentation du temps passé à APO illustrerait ainsi une meilleure régulation de l'effort, permettant au cycliste d'améliorer ses performances. A l'inverse, une augmentation du temps passé à IPO provoquerait davantage de fatigue ou de pertes biomécaniques dues aux variations de vitesse, menant à de moins bonnes performances. Cependant, ces pourcentages de temps passés à APO et IPO sont directement dépendants du parcours du CLM, et notamment des virages, des montées et des descentes rencontrés. En conséquence, il semble difficile de comparer directement les pourcentages de temps passés à APO et IPO entre plusieurs CLM réalisés sur des parcours différents. L'objectif de cette étude était donc de proposer une

première méthode permettant de comparer les indices EVA entre plusieurs CLM réalisés sur des parcours différents par un même athlète.

Méthodes :

Les $P_{méca}$ développées ont été recueillies pour deux cyclistes professionnels de niveau World-Tour lors de sept CLM en compétitions officielle, réalisés entre avril 2013 et juin 2017 et pour des distances allant de 18,7 à 51,6 km. Les fluctuations de $P_{méca}$ ont été analysées à l'aide de la méthode EVA telle que définie précédemment (avec des zones d'intensité extrêmes délimitées à 90 et 110 % de la $P_{méca}$ moyenne), afin de déterminer les pourcentages de temps passés à APO, IPO et REG. Pour chaque CLM, les valeurs de $\Delta_{cycliste1-cycliste2}$ ont été calculées à partir de la différence entre les valeurs du premier participant (cycliste étudié) et du second participant (cycliste référence) pour les données de $P_{méca}$ moyenne développée (exprimée en W ou en %_{record-PPR}), et pour les pourcentages de temps passés à APO, IPO et REG. Les relations entre ces $\Delta_{cycliste1-cycliste2}$ de $P_{méca}$ moyenne développée et de pourcentages de temps passés à APO, IPO et REG ont été analysées à l'aide de coefficients de corrélation de Pearson.

Résultats :

Les $\Delta_{cycliste1-cycliste2}$ pour les $P_{méca}$ moyennes de chaque CLM étaient compris entre -24 et +39 W, pour des potentiels physiques proches entre les deux participants (records de puissance sur 60 minutes de 374 et 355 W respectivement). Une relation négative significative a été identifiée entre $\Delta_{cycliste1-cycliste2}$ de $P_{méca}$ moyenne exprimée en W et $\Delta_{cycliste1-cycliste2}$ de temps passé à IPO ($r = -0,70$; $p = 0,05$). Des relations encore plus fortes sont observables lorsque $\Delta_{cycliste1-cycliste2}$ de $P_{méca}$ moyenne est exprimé en %_{record-PPR}, avec $\Delta_{cycliste1-cycliste2}$ de temps passé à IPO ($r = -0,94$; $p = 0,002$; **Figure 32a**) et de temps passé à APO ($r = 0,86$; $p = 0,01$; **Figure 32b**).

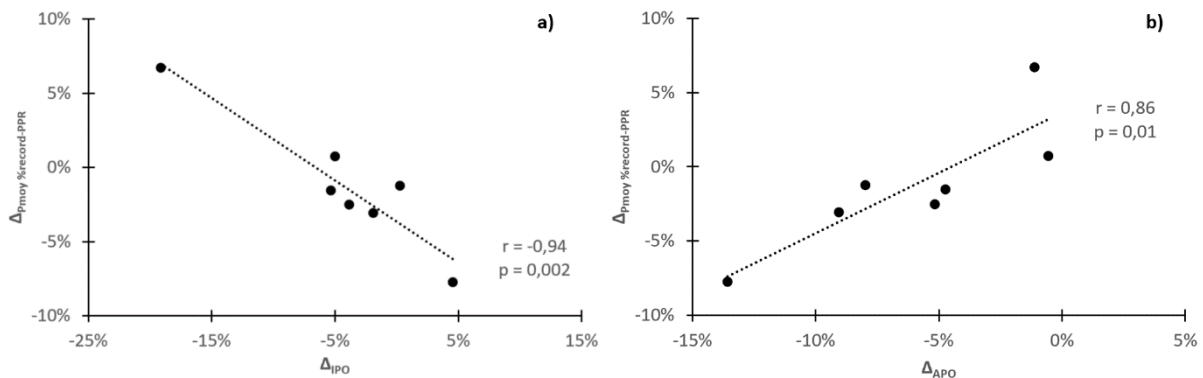


Figure 32. Relations entre $\Delta_{cycliste1-cycliste2}$ de $P_{méca}$ moyenne (exprimée en %_{record-PPR}) et $\Delta_{cycliste1-cycliste2}$ de pourcentage de temps passés à IPO (a) et APO (b).

Discussion :

Les résultats de cette étude suggèrent que les temps passés à IPO et APO sont des indicateurs intéressants pour suivre les mécanismes de régulation de l'effort et prédire la $P_{méca}$ moyenne développée lors de plusieurs CLM réalisés par deux cyclistes sur des parcours différents. Les relations encore plus fortes entre ces paramètres EVA et la $P_{méca}$ moyenne lorsque celle-ci est exprimée en $\%_{record-PPR}$ suggèrent que les temps passés à APO et IPO seraient très fortement reliés à la capacité du cycliste à exploiter au mieux son potentiel physique en compétition. En comparaison à un cycliste référence, plus un athlète serait en mesure d'augmenter le temps passé à APO et de diminuer le temps passé à IPO et plus il augmenterait sa $P_{méca}$ moyenne et améliorerait ainsi ses performances en CLM. Ces résultats sont notamment en accords avec les précédentes études ayant démontré que maintenir un niveau de $P_{méca}$ constant était optimal pour la performance lors de CLM sous des conditions environnementales constantes (Foster *et coll.*, 1993, Atkinson et Brunskill 2000, Abbiss et Laursen 2008, Wells *et coll.*, 2013). A l'inverse, augmenter les variations de $P_{méca}$ serait susceptible d'augmenter les pertes biomécaniques et la fatigue (Abbis et Laursen 2008, Wells *et coll.*, 2013).

Conclusion et perspectives :

L'analyse EVA semble être une méthode intéressante pour suivre les mécanismes de régulation de l'effort et la performance lors de plusieurs CLM à partir de la comparaison des données avec un coureur référence. Plus le cycliste étudié passe un temps important à APO par rapport à cette référence et plus il sera capable d'exploiter une part importante de son potentiel physique et donc d'être performant en CLM. A l'inverse, plus son temps passé à IPO augmente par rapport à cette référence et plus il risque d'augmenter sa fatigue et ses pertes biomécaniques, ce qui entraînerait une diminution de ses performances.

Cependant, la fait que cette méthode impose de comparer les données du cycliste étudié avec celles d'un cycliste référence représente sa principale limite. En effet, il est possible que les variations $\Delta_{cycliste1-cycliste2}$ de $P_{méca}$ moyenne ou d'indices EVA soient dues à une modification des mécanismes de régulation de l'effort du cycliste étudié mais également du cycliste référence, qui étant engagé sur la même compétition s'efforce de la même manière à réaliser la meilleure performance possible. En conséquence, il serait intéressant pour les études futures de proposer une nouvelle méthode permettant de définir de manière plus fiable ces indices EVA de référence, afin de pouvoir normaliser les données du cycliste étudié en fonction du parcours, sans avoir à le comparer à un autre cycliste.

The new Exposure Variation Analysis (EVA) method to compare pacing strategy and performance during professional time-trial competitions

Ouvrard, T.^{1,2}, Pinot, J.³, Gros Lambert A.¹, Grappe, F.^{1,3}

Purpose:

Several studies underlined the impact of pacing strategy on cycling time-trial performance. It has been reported that under steady environmental conditions, maintaining a constant power output (PO) is the most efficient strategy to improve performance (Wells et al. 2013). The Exposure Variation Analysis (EVA) method has recently been proposed to evaluate these pacing strategies, quantifying for an optimal constant pacing strategy the times spent at an accurate PO (APO), at an inappropriate PO (IPO), and the short-time regulations of inappropriate PO (REG) (Ouvrard et al. 2017). It has been demonstrated that increasing time spent at APO and decreasing time spent at IPO allows cyclists to develop higher mean PO and improve performance (Ouvrard et al. 2018. Under review). However, as these indexes are influenced by time-trials course, they were never used to monitor pacing strategies and performance for several time-trials performed by the same cyclists yet. The aim of this study was to analyse the relationships between changes of performance, mean PO and EVA pacing parameters in two professional cyclists during seven official competitive time-trials.

Methods:

PO were collected for two professional cyclists (mean $\dot{V}O_{2max}$ 79.0 ± 8.5 mL.min⁻¹.kg⁻¹) during the seven-same time-trials (performed between April 2013 and June 2017 and ranged from 18.7 to 51.6 km). PO fluctuations were analysed from EVA to quantify times spent at APO (PO between 90 and 110 % of mean time-trial PO), IPO (PO lower than 90 % or higher than 110 % of mean PO for more than 10 s) and REG (PO lower than 90 % or higher than 110 % of mean PO for less than 10 s). Relationships between Δ_{meanPO} (differences between subject 1 and subject 2 mean PO for each time-trial) and $\Delta_{meanPO\%}$ (differences between subject 1 and subject 2 mean PO, each expressed as a percentage of the subject's record PO on the time trial duration) and Δ_{APO} (differences between subject 1 and subject 2 times spent at APO), Δ_{IPO} (differences between subject 1 and subject 2 times spent at IPO), and Δ_{REG} (differences between subject 1 and subject 2 REG) were assessed thanks to Pearson correlation coefficients.

Results & Discussion:

Δ_{meanPO} ranged from -24 to +39 W for similar physical potentials (20-min record PO 432 vs 428 W). A trend to a negative relationship was identified between Δ_{meanPO} and Δ_{IPO} ($r = -0.70$, $p = 0.08$). Stronger and significant relationships were identified between $\Delta_{meanPO\%}$ and Δ_{IPO} ($r = -0.94$, $p = 0.002$) and Δ_{APO} ($r = 0.86$, $p = 0.01$, Figure 1). The main finding of this study is that, when comparing two cyclists during several time-trials, changes of EVA pacing parameters were related to changes of cyclists' ability to develop high mean PO. The more the cyclists were able to decrease their time spent at IPO and increase their time spent at APO, the more they had a maximal use of their physical capacity during the time-trial, allowing them to develop higher mean PO expressed as a percentage of their record PO. These results are in accordance with Wells et al. (2013), who demonstrated that maintaining a constant PO, and thus increasing time spent at APO, is optimal for time-trial performance under steady environmental conditions. Conversely, increasing PO variations, and consequently time spent at IPO or REG, reflect poor adherence to constant speed, increasing biomechanical losses or fatigue.

Conclusion:

EVA seems to be a valuable method to monitor pacing and performance changes for two cyclists during several time-trials. Values of times spent at IPO and APO can be compared between cyclists to determine if their pacing strategy were optimal to achieve the best performance possible.



T Ouvrad et al (2018). The new Exposure Variation Analysis (EVA) method to compare pacing strategy and performance during professional time-trial competitions.

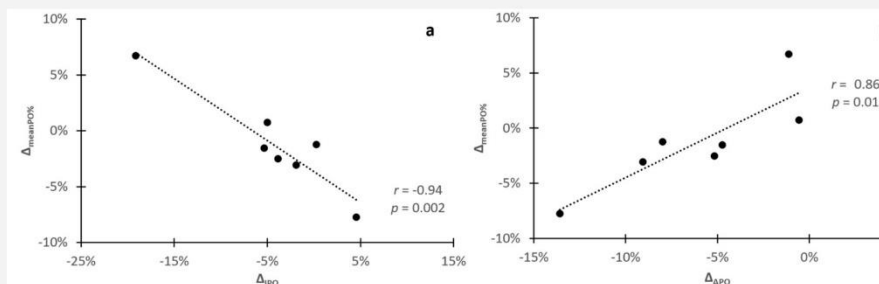


Figure 1. Relationship between $\Delta_{\text{meanPO\%}}$ (differences between subject 1 and subject 2 mean PO, each expressed as a percentage of the subject's record PO on the time trial duration) and Δ_{IPO} (differences between subject 1 and subject 2 times spent at IPO, a) and Δ_{APO} (differences between subject 1 and subject 2 times spent at APO, b)

References:

1. Ouvrad T, Pinot J, Gros Lambert A, Grappe F (2017) Exposure Variation Analysis (EVA) method to monitor ability to optimally regulate exercise intensity of professional cyclists during official time-trial competition. *J Sci Cycling* 6: 58-59
2. Ouvrad T, Pinot J, Gros Lambert A, Grappe F (2018. in review) Elite cycling individual time-trial performance depends both on physical capacity and mental exercise intensity regulation ability. *Int J Sports Physiol Perform*
3. Wells M, Atkinson G, Marwood S (2013) Effects of magnitude and frequency of variations in external power output on simulated cycling time-trial performance. *J Sports Sci* 31: 1639-1646

Key words: Power Output, Exercise intensity control mechanisms, Performance monitoring, Professional cyclists, Record Power Profile.

✉ Contact email: ouvrard.to@gmail.com (T

Ouvrad)

¹ EA4660, C3S Health - Sport Department, Sports University, Besancon, France

² Team Fortunéo - Samsic

³ Cycling Team Groupama - FDJ

CHAPITRE 7 : Conditions d'utilisation et mécanismes physiologiques de la relation entre performance physique et mécanismes de régulation de l'effort évalués à l'aide de la méthode EVA

1. Mécanismes physiologiques explicatifs de la relation entre performance physique et mécanismes de régulation de l'effort évalués à l'aide de la méthode EVA

Les résultats de cette étude ont fait l'objet d'un article soumis dans la revue *European Journal of Applied Physiology* (Ouvrard, Pinot, Groslambert, et Grappe, *en cours de soumission*) : « Accuracy of the critical power model to monitor the level of the anaerobic reserve during professional individual time-trial ».

Résumé détaillé :

Accuracy of the critical power model to monitor the level of the anaerobic reserve during professional individual time-trial

Ouvrard T., Pinot, J., Groslambert A., et Grappe F.

Notes : Le résumé détaillé ci-dessous comprend à la fois les résultats de l'article soumis mentionné ci-dessus ainsi que des données complémentaires non-présentes dans cet article.

Introduction :

Les précédentes études ont permis de mettre en évidence que la justesse des mécanismes de régulation de l'effort, évaluée à l'aide de la méthode EVA, était directement liée à la capacité du cycliste à exploiter au maximum son potentiel physique en compétition et donc à sa performance. Cependant, les mécanismes physiologiques permettant d'expliquer les relations entre la régulation de l'effort et la performance demeurent méconnus. Certains auteurs ont émis l'hypothèse que l'augmentation des variations de puissance pourrait entraîner une augmentation

de la sollicitation du métabolisme anaérobie, à l'origine d'un niveau de fatigue plus important pour un même niveau de $P_{méca}$ moyenne (Abbiss et Laursen 2008). Cependant, aucune étude n'est encore parvenue à vérifier cette hypothèse.

Les modélisations mathématiques sont extrêmement intéressantes pour les chercheurs en sciences du sport. Non seulement ces modèles peuvent être utilisés afin de mieux comprendre les mécanismes à l'origine de la performance sportive, mais ils permettent également d'identifier de nouvelles stratégies visant à optimiser les performances des athlètes (Atkinson *et coll.*, 2003, Dahmen *et coll.*, 2012). Le modèle de la puissance critique peut notamment être utilisé afin d'analyser la dépense métabolique en CLM. Ce modèle se base sur deux paramètres essentiels : la puissance critique (P_{crit} , en W) qui représente l'intensité maximale qui peut être soutenue exclusivement à partir de la filière aérobie, et qui pourrait ainsi être maintenue en théorie indéfiniment ; et la capacité maximale du métabolisme anaérobie (W' , en kJ), qui représenterait la quantité de travail maximale pouvant être effectuée à une intensité supérieure à P_{crit} , quelle que soit la vitesse à laquelle ces réserves anaérobies seront consommées. Grâce à ce modèle théorique, il est ainsi possible de suivre l'évolution des réserves anaérobies (W'_{bal} , en KJ) lors d'un effort d'endurance (Morton et Billat 2004, Jones *et coll.*, 2010, Skiba *et coll.*, 2012). Historiquement, les paramètres P_{crit} et W' sont calculés grâce à la relation entre la durée d'effort et la quantité de travail maximale effectuée, tracée à partir de trois efforts maximaux réalisés en laboratoire (Monod et Scherrer 1965). Désormais, grâce au développement et à la popularisation des capteurs portatifs pour la mesure de la $P_{méca}$ en cyclisme, ces paramètres peuvent également être estimés à partir des records de $P_{méca}$ réalisés sur le terrain. Cependant, aucune étude n'a encore, à notre connaissance, utilisé ces données de terrain afin de déterminer P_{crit} et W' . A partir de ces données, il serait ensuite possible de suivre la consommation de W'_{bal} lors de CLM en compétition officielle sur le terrain. L'objectif de cette étude était ainsi d'analyser la consommation des réserves anaérobies W'_{bal} lors d'un CLM en compétition officielle sur le terrain, et d'étudier les relations entre cette dépense métabolique et les paramètres de gestion de l'effort de l'analyse EVA. En nous appuyant sur les études antérieures, nous avons émis l'hypothèse que la méthode W'_{bal} pouvait représenter une méthode fiable pour analyser la dépense métabolique lors de CLM réalisés sur le terrain, avec un niveau de W'_{bal} restant relié à l'effort réalisé par les athlètes. En ce qui concerne les mécanismes de régulation de l'effort, nous avons également émis l'hypothèse que les paramètres de temps passés à APO et IPO de la méthode EVA pourraient être significativement reliés au niveau de W'_{bal} consommé lors du CLM.

Méthodes :

Six cyclistes professionnels membres d'une équipe World-Tour ont participé à cette étude. Leurs paramètres P_{crit} et W' ont été calculés à partir de leurs records de $P_{méca}$ sur 5, 20 et 30 min d'après la méthode de Monod et Scherrer (1965). Leurs données de $P_{méca}$ ont ensuite été recueillies lors d'un CLM en compétition officielle de niveau World-Tour. Pour chaque participant, le niveau de W'_{bal} a été calculé sur l'ensemble du CLM à partir des formules développées par Morton et Billat (2004). Les temps passés à APO, IPO et REG ont également été quantifiés à l'aide de la méthode EVA telle que présentée précédemment. Les relations entre la dépense W'_{bal} totale et les temps passés à APO, IPO et REG ont été analysées à l'aide de tests de corrélation de Pearson. La différence entre le niveau de W'_{bal} restant à la fin du CLM et le niveau de W'_{bal} restant en théorie à la fin d'un exercice épuisant, à savoir 1,5 kJ tel que déjà démontré par Skiba *et coll.* (2012), a été déterminée à l'aide d'un test t à un échantillon. Les relations entre P_{crit} et le record de $P_{méca}$ sur 60 min et entre W' et les records de $P_{méca}$ sur 30 et 60 s des sujets ont également été analysées à l'aide de tests de corrélation de Pearson. Enfin, la différence entre P_{crit} et le record de $P_{méca}$ sur 60 min des sujets a été analysée à l'aide d'un test t pour échantillons appariés.

Résultats :

Aucune relation significative n'était identifiable entre le niveau de W'_{bal} consommé pendant le CLM et les temps passés à APO, IPO ou REG. Le niveau de W'_{bal} restant à la fin du CLM était significativement supérieur à 1,5 kJ ($14,4 \pm 12,8$ KJ soit $51,4 \pm 39,4$ % de W' ; $p = 0,03$). Le niveau de W'_{bal} minimal atteint lors du CLM était de $1,3 \pm 4,2$ kJ soit $4,8 \pm 14,0$ % de W' , avec 3 cyclistes conservant des valeurs de W'_{bal} minimales comprises entre 10 et 20 % de W' , et 3 autres atteignant des valeurs de W'_{bal} minimales négatives pendant le CLM (comprises entre -4,9 et -12,1 % de W'). P_{crit} était significativement corrélée au record de $P_{méca}$ sur 60 min ($r = 0,961$; $p = 0,002$). Cependant, P_{crit} était significativement supérieure au record de $P_{méca}$ sur 60 min (372 ± 35 W vs 353 ± 45 W ; $p = 0,02$) et aucune relation significative n'était observable entre W' et les records de $P_{méca}$ sur 30 et 60 s (**Figure 33**).

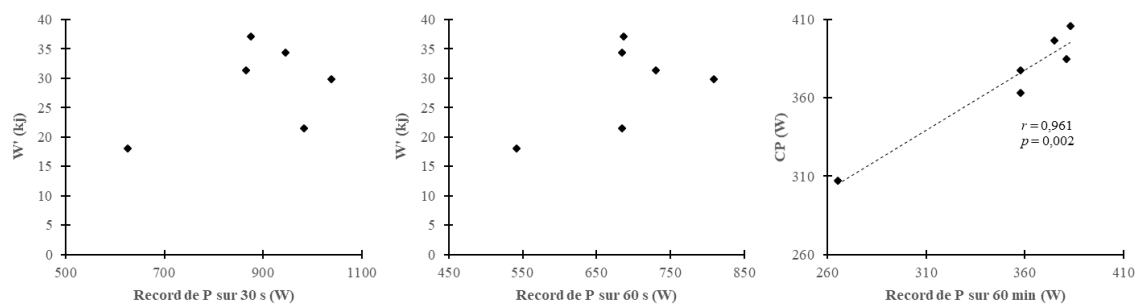


Figure 33. Relations entre W' et P_{crit} et les records de puissance sur 30 s, 60 s et 60 min.

Discussion :

L'objectif de cette étude était d'identifier les mécanismes physiologiques susceptibles d'expliquer les relations entre la régulation de l'effort, quantifiée à l'aide de la méthode EVA, et la performance en CLM. Cependant, aucune relation n'a été mise en évidence entre les paramètres EVA et le niveau de W'_{bal} consommé pendant le CLM. Cette absence de relation semble avant tout due aux limites de la méthode W'_{bal} pour l'analyse de la dépense métabolique lors de CLM sur le terrain.

A notre connaissance, cette étude est la première à utiliser la méthode W'_{bal} afin de suivre la consommation métabolique en CLM sur le terrain. Cependant, le niveau de W'_{bal} restant à la fin du CLM était significativement supérieur à 1,5 kJ ($14,4 \pm 12,8$ KJ soit $51,4 \pm 39,4$ % of W' ; $p = 0,03$). Or, ce CLM étant réalisé en compétition officielle, l'ensemble de nos participants ont réalisé cet effort à intensité maximale volontaire. De plus, de nombreuses études ont déjà montré que ce type d'effort en CLM menait les participants jusqu'à un état proche de l'épuisement (Lambert *et coll.*, 1994, McMahon *et coll.*, 2002, Ivy *et coll.*, 2003, Pritchett *et coll.*, 2009), et entraînait des perturbations physiologiques majeures (Hermansen *et coll.*, 1967, Gollnick *et coll.*, 1974, Rauch *et coll.*, 2005). En conséquence, il est possible de supposer que nos participants ont terminé le CLM dans un état proche de l'épuisement, avec la majorité de leurs réserves métaboliques épuisées. Cependant, la méthode W'_{bal} ne permet pas de confirmer cet état physiologique, avec un niveau important de W'_{bal} restant à la fin du CLM. Nos résultats révèlent que cette différence s'expliquerait principalement par de multiples problèmes liés à l'utilisation de la méthode W'_{bal} lors de CLM sur le terrain, avec notamment des incohérences dans la détermination des paramètres P_{crit} et W' à partir des records de $P_{méca}$ de terrain et des formules pour le calcul de W'_{bal} qui entraînent une récupération trop rapide lorsque la $P_{méca}$ est inférieure à P_{crit} .

Tout d'abord, W' n'était pas significativement reliée aux records de $P_{méca}$ sur 30 et 60 s, qui illustrent les qualités physiques de capacité anaérobie des cyclistes (Withers *et coll.*, 1991). De plus, même si P_{crit} était significativement reliée au record de $P_{méca}$ sur 60 min, nos résultats révèlent également que P_{crit} était significativement supérieure au record de $P_{méca}$ sur 60 min des participants. Il serait donc impossible pour nos participants de maintenir une intensité d'effort équivalente à P_{crit} pour des durées égales ou supérieures à 60 min. En conséquence, les paramètres W' et P_{crit} déterminés à partir des records de $P_{méca}$ de terrain seraient incohérents vis-à-vis des principales hypothèses du modèle W'_{bal} (Housh *et coll.*, 1989, Vanhatalo *et coll.*, 2010, Skiba *et coll.*, 2012). Bien que le niveau de W'_{bal} soit significativement supérieur à 1,5 kJ à la fin du CLM, nos résultats révèlent également que 3 des participants ont atteint des niveaux de W'_{bal} négatifs pendant le CLM, malgré aucun signe visible d'épuisement. Or d'après le modèle de la puissance critique, il est impossible d'atteindre des valeurs négatives de W'_{bal} , puisque l'athlète est censé être épuisé et incapable de maintenir une $P_{méca}$ supérieure à P_{crit} dès que ses réserves de W'_{bal} sont épuisées ou deviennent inférieures à 1,5 kJ (Monod et Scherrer 1965, Skiba *et coll.*, 2012). Ainsi, nos résultats mettent également en évidence que les formules permettant le calcul de W'_{bal} présentent quelques incohérences, menant notamment à un niveau de W'_{bal} négatif avant la fin du CLM malgré aucun signe visible d'épuisement et permettant une récupération bien trop rapide du niveau de W'_{bal} ensuite, avec des valeurs bien supérieures à 1,5 kJ à la fin d'un CLM à intensité maximale volontaire (**Figure 34**). Ces formules doivent être encore améliorées afin de permettre l'analyse de la dépense métabolique en CLM sur le terrain. En conséquence, il est pour le moment impossible de conclure à partir de cette méthode concernant l'influence des mécanismes de régulation de l'effort, évalués à l'aide de la méthode EVA, sur la dépense métabolique en CLM.

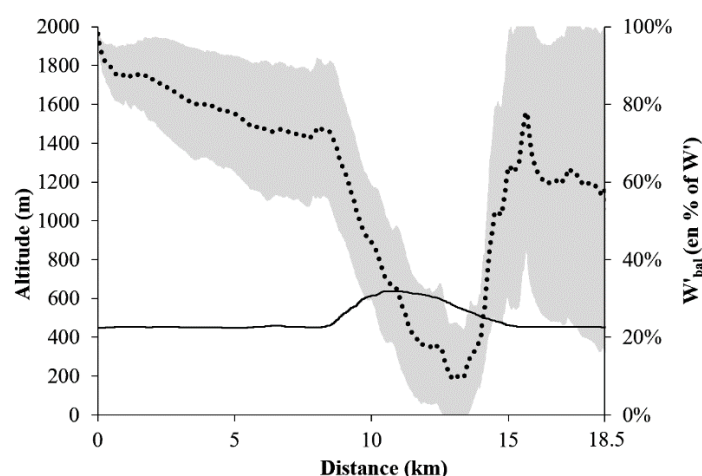


Figure 34. Profil du parcours et valeur moyenne (ligne pointillée) et écart-type (en gris) de W'_{bal} sur l'ensemble du CLM

Conclusion et perspectives :

Cette étude est la première, à notre connaissance, à utiliser la méthode W'_{bal} pour analyser la dépense métabolique lors d'un CLM en compétition officielle. Cependant, les incohérences dans la détermination des paramètres P_{crit} et W' à partir des records de $P_{méca}$ de terrain limitent la capacité de cette méthode à prédire l'épuisement lors de ces CLM. Il serait intéressant pour les études futures d'optimiser les formules à l'origine de cette méthode afin de la rendre réellement utilisable pour les athlètes et les entraîneurs sur le terrain.

L'objectif de cette étude était de mieux comprendre les mécanismes physiologiques à l'origine des relations entre la performance en CLM et la régulation de l'effort, quantifiée à l'aide de la méthode EVA. Cependant, en raison des limites de la méthode W'_{bal} , les hypothèses évoquées n'ont pas pu être réellement testées. Il serait donc intéressant pour les études futures d'essayer à nouveau d'analyser ces relations entre temps passés à APO, IPO et REG et les paramètres physiologiques de l'athlète à l'aide d'autres méthodes plus fiables.

1 **Accuracy of the critical power model to monitor the level of the anaerobic reserve**
2 **during professional individual time-trial**

3

4 Theo OUVRARD¹, Julien PINOT², Alain GROSLAMBERT¹ & Frederic GRAPPE^{1,2}

5

6 **Affiliations:**

7 ¹ Univ. Bourgogne Franche-Comté, C3S, Sport Performance Dpt, EA4660, Besançon, France

8 ² Professional Cycling Team FDJ, Moussy le Vieux, France

9

10 **Corresponding author:**

11 *Theo Ouvrard*

12 Orcid ID: 0000-0002-9075-7968

13 University of Franche-Comte

14 Culture – Sport – Health – Society (C3S), Sport-Performance Department

15 UPFR Sports

16 31 chemin de l'épitahe

17 25000 Besançon

18 France

19 ouvrard.to@gmail.com

1 **Abstract**

2

3 Critical power (CP) model offers interesting tools to analyse cycling time-trial (ITT)
4 performance, allowing to predict exhaustion from the level of power output (PO) sustained by
5 the athlete. However, this method was never used to analyse performance during field
6 competitive ITT yet. **Purpose:** The aim of this study was to assess the accuracy of CP model
7 computed from field PO data to monitor level of anaerobic reserve (W'_{bal}) during ITT.
8 **Methods:** PO were recorded for 6 professional cyclists during a World-Tour ITT. CP and
9 anaerobic capacity (W') of the participants were determined from their field mean maximal
10 PO, determined using the Record Power Profile method. W'_{bal} were calculated for the entire
11 ITT. **Results:** W'_{bal} at the end of the ITT was significantly higher than 1.5 kJ ($51.4 \pm 39.4\%$
12 of W' ; $p = 0.02$). W' was not significantly related to anaerobic capacity indices (30 and 60 s
13 record PO) and CP was significantly higher than participants' 60-min PO record ($+ 19 \pm 14$
14 W; $p = 0.02$). **Conclusions:** CP modelling determined that W'_{bal} was not fully depleted at the
15 end of the ITT. However, important differences of W'_{bal} amongst cyclists were observable
16 during the ITT, with inconsistent results for several participants. These results can be due to
17 some inaccuracies in CP and W' determined from field PO records, with values conflicting
18 with the assumptions of the CP theoretical framework. Future studies should try to optimise the
19 formulas of the CP model to make it relevant to analyse field ITT.

20

21 **Keywords**

22

23 *Cycling, Mathematical modelling, Pacing strategy, Critical power, Anaerobic reserve.*

24

1 **Abbreviations:**

2

Anaerobic work capacity	W'
Anaerobic work capacity balance	W'_{bal}
Critical power	CP
Effort duration	t
Individual time-trial	ITT
Level of anaerobic work capacity for the previous second	$W'_{available}$
Power output	PO
Rate of anaerobic work capacity expenditure/recovery	W'_{exp}
Record Power Profile	RPP
Schoberer Rad Meßtechnik	SRM
Total work	W_{total}

3

1 **INTRODUCTION**

2

3 Over the last two decades, one of the key topics in the sport sciences was pacing strategy. The
4 term 'pacing' has been defined since the early 1990s as the rate of energy expenditure during
5 an endurance task (Abbiss and Laursen 2008; Foster et al. 1994). During self-paced
6 endurance events such as cycling individual time-trials (ITT), the ability to choose an optimal
7 pacing strategy has a strong influence on performance, as athletes must accurately judge the
8 remaining effort duration and the exercise intensity they will be able to sustain in order to
9 avoid exhaustion prior to the finish line (Tucker 2009). Several studies have already
10 demonstrated that an optimal pacing strategy allows athletes to improve their ITT
11 performance (Atkinson and Brunskill 2000; Foster et al. 1993) by reducing their
12 biomechanical losses or levels of fatigue (Abbiss and Laursen 2008; Wells et al. 2013).

13

14 Mathematical modelling is extremely interesting for sport scientists. These models can not
15 only be used to provide a better understanding of the inner mechanisms underlying athlete's
16 performance, but can also allow for the identification of new strategies to improve that
17 performance (Atkinson et al. 2003; Dahmen et al. 2012). Concerning pacing strategy,
18 mathematical models have already underlined that the optimal ITT pacing strategy involves
19 increasing the power output (PO) uphill and decreasing the PO downhill (Atkinson and
20 Brunskill 2000; Atkinson et al. 2007a; Atkinson et al. 2007b; Cangle et al. 2011; Swain
21 1997; Wells and Marwood 2016) and conversely, that on a uniformly flat course, a constant
22 PO must be maintained to reduce biomechanical losses (Wells et al. 2013). Due to this kind of
23 modelling, the optimal pacing strategy can be identified to achieve the best performance
24 possible for a given mean PO (de Koning et al. 1999; Gordon 2005; Swain 1997).

25

26 The rate of metabolic expenditure during ITT can also be monitored using mathematical
27 modelling. One of the most popular models for this type of human bioenergetic analysis is the
28 critical power model and it is based on two main components: the critical power (CP, in W),
29 which is the upper intensity limit for the aerobic system, below which effort can be sustained
30 without accumulating fatigue; and the anaerobic work capacity (W' , in kJ), which represents
31 the maximal work that can be performed above CP prior to exhaustion, regardless of the rate
32 at which these reserves are consumed (Jones et al. 2010; Monod and Scherrer 1965). Thanks
33 to this theoretical framework, the W' reserve balance (W'_{bal} , in kJ) can be continuously
34 monitored during endurance exercise in order to predict exhaustion due to a complete

4

1 depletion of metabolic reserves (Jones et al. 2010; Morton and Billat 2004; Skiba et al. 2012).
2 Recently, Morton and Billat proposed a specific method to calculate W'_{bal} during variable-
3 intensity exercise (Morton and Billat 2004), as encountered during official competitive ITT in
4 the field.

5

6 Several methods have been proposed to determine athletes' CP and W' (Monod and Scherrer
7 1965; Vanhatalo et al. 2007). Historically, these parameters are determined as the slope (for
8 CP) and the origin (for W') of the curve of the relationship between effort duration and total
9 work performed, obtained from at least three maximal efforts lasting between 3 and 30 min
10 (Monod and Scherrer 1965). A single 3-min all-out laboratory test has also been proposed to
11 determine CP and W' (Vanhatalo et al. 2007). However, thanks to the development and
12 popularisation of portable devices for measuring PO during cycling efforts, field data can also
13 be used to determine these parameters. Indeed, Pinot and Grappe recently proposed the
14 Record Power Profile (RPP) method to assess cyclists' maximal PO for efforts ranged
15 between 1 s and 5 h from field training and competitive PO data (Pinot and Grappe 2011).
16 These authors even suggested that this method is the most accurate way to assess cyclists'
17 physical capacities. However, to the best of our knowledge, these PO records have not yet
18 been used to determine CP and W' , and W'_{bal} expenditure during official competitive ITT in
19 the field has never been monitored with the CP model to date. Consequently, the aim of this
20 study was to assess the accuracy of the CP model computed from PO field data to monitor
21 metabolic expenditure and analyse the changes in W'_{bal} in elite professional cyclists during
22 ITT races. We hypothesised that 1) the use of PO records allows for an accurate determination
23 of cyclists' CP and W' , 2) field ITT represent a maximal voluntary effort where most of the
24 W'_{bal} reserves are depleted at the end of the exercise, and 3) a critical physiological state is
25 reached when W'_{bal} is lower than 1.5 kJ, forcing the athlete to decrease PO, as already shown
26 by Skiba et al. (2012).

27

28 **METHODS**

29

30 **Participants**

31 Six professional cyclists volunteered to participate in this study. Their mean $\pm$ standard-
32 deviation values for height, body mass, and maximal aerobic power were 179.8 ± 8.8 cm,
33 65.2 ± 6.9 kg, and 437 ± 52 W, respectively. All the participants were members of a World-

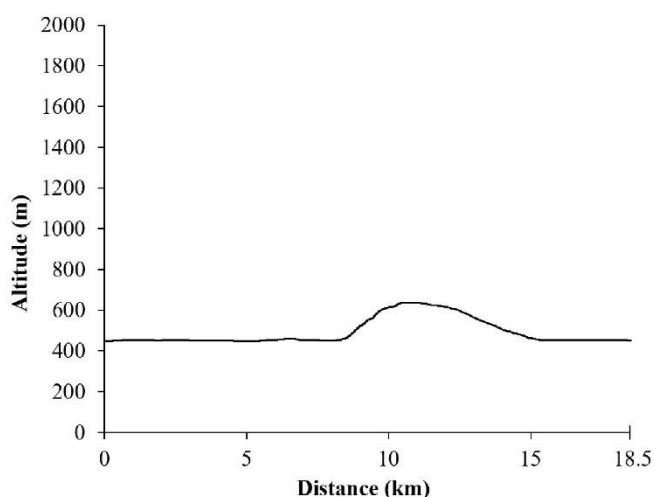
1 Tour professional cycling team, and consequently they followed a regular training regimen
2 and participated in professional races throughout the season.

3

4 **Procedures**

5 This study took place around an official competitive ITT during the 2014 professional cycling
6 season. The ITT course included a one-lap circuit of 18.5 km with 195 m of total elevation
7 gain (Figure 1). All the participants performed the ITT on their personal ITT bikes, and did
8 not encounter any mechanical problems during the race. The race was part of the Union
9 Cycliste Internationale official calendar and was classified as a World-Tour level race (Tour
10 de Romandie 2014, stage 5). The weather conditions remained stable during the event, with a
11 mean temperature of 13°C, with 46% humidity and no precipitation.

12



13

14

Figure 1. Analysed time-trial course altimetry

15

16 **CP and W' determination**

17 According to Pinot and Grappe, RPP of the participants were determined for the 2014 cycling
18 season (Pinot and Grappe 2011). For this determination, the cyclists performed the entire
19 cycling season with SRM power meters (Schoberer Rad Meßtechnik, Jülich, Germany)
20 mounted on their personal TT bikes. According to the manufacturers' recommendations, the
21 calibration slope of each SRM was verified three times during the season. After each training
22 session and competition, the cyclists transferred their data from Garmin Edge device into

1 TrainingPeaks software to identify their maximal mean PO for each SRM file. At the end of
2 the cycling season, RPP was determined for each participant based on their highest mean
3 maximal PO developed for durations of 1, 5, 30 and 60 s and 5, 10, 20, 30, 45, 60, 120, 180
4 and 240 min. Then, their 5-, 20- and 30-min PO records were used to determine the
5 relationship between total work (W_{total} , in kJ) and effort duration (t , in s). CP and W' values
6 were determined from this relationship, according to the original method of Monod and
7 Scherrer (1965):

8

$$9 \quad W_{total} = W' + CP \cdot t$$

10

11 **Time-trial PO data collection**

12 The ITT PO data were collected via mobile SRM power meters mounted on the participants'
13 personal ITT bikes. During the entire ITT, PO (W) and cadence (rpm) were recorded
14 continuously at a frequency of 1 Hz using Garmin Edge 800 devices (Olathe, USA).
15 According to the manufacturers' recommendations, the calibration of each SRM was
16 previously verified as described above.

17

18 **W'_{bal} modelling**

19 For each participant, W'_{bal} remaining at the end of the ITT was determined according to the
20 formulas detailed by Morton and Billat (2004). Firstly, the rate of W'_{bal} expenditure/recovery
21 (W'_{exp}) was calculated for each second of the ITT using the following formula:

22

$$23 \quad W'_{exp} = PO - CP$$

24

25 Consequently, W'_{bal} was consumed when PO was higher than CP. Inversely, W'_{bal} was
26 restored when PO was lower than CP, thus illustrating the recovery of the athlete. Then, W'_{bal}
27 was calculated for each second:

28

$$29 \quad W'_{bal} = W'_{available} - W'_{exp}$$

30

31 where $W'_{available}$ is W'_{bal} for the previous second (corresponding to W' for the first second of
32 the ITT). W'_{bal} remaining at the end of the ITT and the minimal level of W'_{bal} reached during
33 the ITT were analysed for each participant.

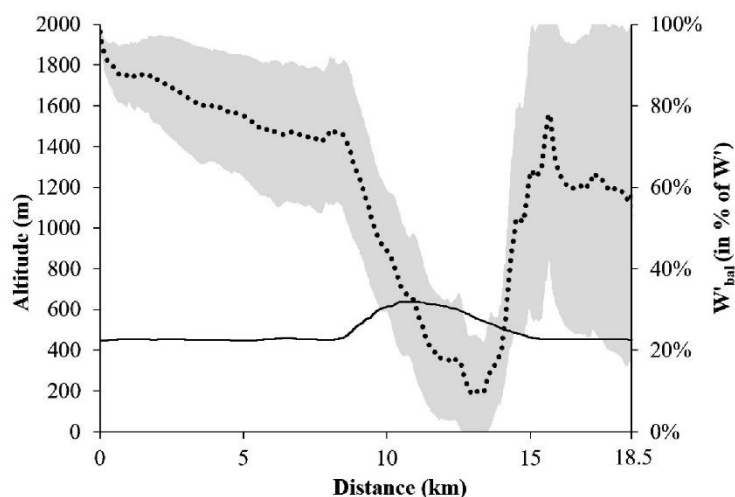
34

1 Statistical analysis

2 Descriptive statistics were computed, and all data were expressed as mean $\pm$ standard
 3 deviation. The Shapiro-Wilk test was used to verify the Gaussian distribution of all results.
 4 The differences between the W'_{bal} remaining at the end of the ITT and the expected W'_{bal}
 5 remaining after exhaustive exercise (i.e. 1.5 kJ, as already shown by Skiba et al. 2012) were
 6 assessed using one-sided one-sample t-test. The relationships between CP and 60-min record
 7 PO and between W' and 30 s and 60 s record PO were analysed using Pearson correlation
 8 coefficients. Finally, the differences between CP and 60 min record PO were analysed using
 9 pairwise t-test. All the statistical analyses were performed using SigmaPlot 12.0 software
 10 (Systat Inc. San Jose, USA) and the alpha value for those analyses was set at $p < 0.05$.

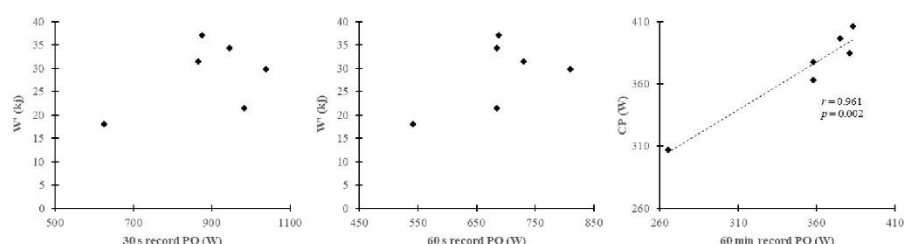
12 RESULTS

14 Participants mean CP and W' were 372 ± 35 W and 28.7 ± 7.5 kJ respectively. Mean ITT
 15 duration was 26 min 4 s $\pm$ 53 s, for a mean PO of 379 ± 41 W (5.8 ± 0.4 W/kg) or $86.8 \pm$
 16 3.7% of maximal aerobic power. W'_{bal} remaining at the end of the ITT were significantly
 17 higher than 1.5 kJ (14.4 ± 12.8 kJ or 51.4 ± 39.4 % of W' , $p = 0.03$; Figure 2).



19
 20 **Figure 2.** Course altimetry (straight line), average values (dotted line) and standard-deviation
 21 (light grey shading) of W'_{bal} during the ITT.

1 CP was significantly related to 60-min record PO ($r = 0.961$, $p = 0.002$). However, the
2 pairwise t-test revealed that CP was significantly higher than 60-min record PO (372 ± 35 W
3 vs 353 ± 45 W; $p = 0.02$), and no significant relationship could be identified between W' and
4 30-s or 60-s record PO ($r = 0.456$, $p = 0.364$ and $r = 0.559$ and $p = 0.248$, respectively; Figure
5 3).



8 **Figure 3.** Relationships between CP and W' parameters and 30 s, 60 s and 60 min record PO

10 Finally, the mean value for the minimal W'_{bal} level reached during the ITT was 1.3 ± 4.2 kJ or
11 4.8 ± 14.0 % of W' , with three participants conserving values between 10 and 20% of W' and
12 three participants reaching negative values for their W'_{bal} during the ITT (ranging from -4.9
13 to -12.1% of W').

15 DISCUSSION

17 To the best of our knowledge, this study is the first to model W'_{bal} reserves to analyse
18 performance during an official competitive field ITT. However, our results reveal that this
19 method has several problems for analysing PO field data.

21 Mainly, the level of W'_{bal} remaining at the end of the ITT was significantly higher than 1.5 kJ
22 (14.4 ± 12.8 kJ or 51.4 ± 39.4 % of W' , $p = 0.03$), which has been shown to be the level of
23 W'_{bal} after maximal voluntary effort, illustrating cyclist exhaustion (Skiba et al. 2012).
24 However, our participants performed the ITT at a very high intensity, with a mean PO of 5.8
25 ± 0.4 W/kg or 86.8 ± 3.7 % of maximal aerobic power, sustained over $26 \text{ min } 4 \text{ s} \pm 53 \text{ s}$. It
26 has already been shown that this level of exercise intensity can be maintained for between 8
27 and 40 min by trained endurance athletes before leading to exhaustion (Ivy et al. 2003;
28 Lambert et al. 1994; McMahon et al. 2002; Pritchett et al. 2009). Furthermore, previous

1 studies have also shown that this kind of very intensive ITT implies a strong solicitation of the
2 anaerobic reserve, with near to maximal values of blood lactate concentration (Foster et al.
3 1994; Ivy et al. 2003; Lambert et al. 1994; Marcora and Staiano 2010; McMahon et al. 2002)
4 and reductions in the cyclists' ability to produce PO (Beelen and Sargeant 1991; Marcora and
5 Staiano 2010; Yano et al. 2001). Consequently, we can assert that our participants completed
6 the field ITT in a state close to exhaustion with most of their anaerobic reserves depleted.
7 However, the results of the W'_{bal} modelling conflict with this physiological statement, with a
8 high level of W'_{bal} reserve remaining at the end of the ITT. Even if a state of exhaustion
9 cannot be directly proven in another task than during time to exhaustion at a predetermined
10 intensity, our results revealed that some inconsistencies in the modelling of W'_{bal} can mainly
11 explain this discrepancy between W'_{bal} remaining at the end of the ITT and the expected W'_{bal}
12 remaining at the end of such difficult and strenuous exercise.

13
14 Our findings show that these inconsistencies in the W'_{bal} values can be due both to problems
15 in CP and W' parameters determined from PO field records and to some inaccuracies in the
16 formulas used for the calculation of the W'_{bal} rate of recovery. Firstly, to the best of our
17 knowledge, this study is the first to propose the use of PO field records extracted from the
18 cyclists' RPP to determine the values of CP and W' . However, even if this method seems
19 interesting and scientifically relevant in terms of determining the true maximal CP and W'
20 values of athletes in the field, the values for these two parameters obtained in this study
21 showed some inconsistencies. W' is the most controversial aspect of the CP model. If this
22 parameter was originally defined as the anaerobic work capacity (Jones et al. 2010), our
23 results show that W' was not significantly related to record PO for 30 s and 60 s, which has
24 been shown to reflect the athlete's anaerobic capacity (Withers et al. 1991). These results are
25 in accordance with Vanhatalo *et al.*, who have already shown that athletes' W' can be
26 influenced by the level of oxygen supply (Vanhatalo et al. 2010) and who explained that this
27 parameter is related to the slow-component of VO_2 (Vanhatalo et al. 2011). Thus, the precise
28 physiological mechanisms behind W' remain uncertain and it seems that this parameter does
29 not illustrate the maximal capacity of anaerobic metabolism (Jones et al. 2010; Vanhatalo et
30 al. 2011). Vanhatalo et al. suggested that this parameter more likely illustrate the loss of
31 muscular efficiency for exercise intensity that is higher than CP (Vanhatalo et al. 2011).
32 Furthermore, the determination of this W' parameter also presents several methodological
33 limits, with values that can vary depending on the protocol used or the pedalling rate (Karsten
34 et al. 2017; Vanhatalo et al. 2008). The uncertainty regarding the origin of this W' parameter

1 and its variations depending of the conditions on the test being performed partially explain the
2 limits of the W'_{bal} modelling observed in this study.

3

4 The inability of the CP model to predict exhaustion at the end of a field ITT could also be due
5 to some inconsistency in the determination of CP from PO field records. Indeed, recent works
6 on the CP model explained that CP represents a threshold in the development of fatigue,
7 below which exercise intensity can mainly be sustained from aerobic metabolism (Burnley
8 and Jones 2018; Poole et al. 2016; Vanhatalo et al. 2011). Consequently, for an exercise
9 intensity below CP, fatigue must be reduced, and the effort can be sustained for a prolonged
10 time, or even indefinitely in theory. However, our results revealed that the cyclists' CP were
11 significantly higher ($+19 \text{ W}$) than their 60-min record PO ($372 \pm 35 \text{ W}$ vs $353 \pm 45 \text{ W}$; $p =$
12 0.02). Thus, it appears that our participants cannot maintain an exercise intensity equivalent to
13 CP for durations of 60 min or more. These findings are in accordance with Housh et al., who
14 demonstrated that CP can be sustained for $33 \text{ min } 19 \text{ s} \pm 15 \text{ min } 22 \text{ s}$ before exhaustion, and
15 that even PO that are 20% lower than CP cannot be maintained indefinitely (with time to
16 exhaustion being $57 \text{ min } 38 \text{ s} \pm 8 \text{ min } 49 \text{ s}$) by trained cyclists (Housh et al. 1989). Those
17 results are inconsistent with the assumptions of the CP model, as CP is supposed to represent
18 an exercise intensity that can be maintained, in theory, indefinitely. This inconsistency
19 induces some major problems for the calculation of W'_{bal} expenditure/recovery during ITT.
20 Indeed, W'_{bal} formulas state that when PO remained equal to or lower than CP, W' is not
21 consumed and, consequently, exhaustion cannot occur. However, our results revealed that
22 fatigue can still be important at PO lower than CP, leading to exhaustion in less than 60 min.
23 This level of CP is inconsistent with the hypotheses of the CP model in our study and could
24 also be due to the fact that PO field record used to calculate CP and W' came from both flat
25 and uphill efforts. Indeed, Bouillod et al. demonstrated that the uphill mean PO was 11%
26 higher than the flat mean PO for the same effort duration (Bouillod et al. 2017). All of these
27 results suggest that CP (determined both from PO field records but also from maximal-efforts
28 studies in the laboratory) is too high to represent an exercise intensity that can be maintained
29 indefinitely as suggested by the CP model assumptions, which could explain the limits of the
30 formulas used to calculate W'_{bal} during field ITT.

31

32 It can also be expected that psychological parameters could have a strong influence and
33 induce much variability in the determination of CP and W' . Indeed, Salam et al. already
34 demonstrated that W' , but not CP, was significantly reduced in the presence of mental fatigue

1 (Salam et al. 2018). The record PO used in this study to determine CP and W' could be
2 obtained from efforts performed under very different psychological contexts, with, for
3 example, greater motivation when the effort is performed during the most prestigious races.
4 Consequently, we can hypothesise that, even if the results of Salam et al. suggest that CP is
5 less variable depending on the psychological context (Salam et al. 2018), the record PO used
6 in this study are performed under very unusual optimal psychological conditions, which
7 ensure extremely high levels of motivation and allow the cyclists to dig deeper into their W'
8 reserves. As several authors explained that W' is related to a tolerable limit of fatigue-
9 implicated metabolite accumulation (Johnson et al. 2014; Kordi et al. 2018; Vanhatalo et al.
10 2010), it seems logical that higher levels of motivation could allow the cyclists to improve
11 this tolerable limit. Unfortunately, the influence of these psychological parameters on CP
12 model has not yet been taken into account. It could be interesting for future studies to further
13 analyse the influence of these psychological parameters on CP and W' values, and on the
14 athletes' ability to fully use their W'_{bal} reserves.

15

16 These different results underline that CP and W' values determined from PO field records are
17 too high, leading to an excessive level of W'_{bal} remaining at the end of the ITT, which is
18 inconsistent with the maximal voluntary effort performed. However, our results reveal that,
19 for some participants, W'_{bal} can also reach values that are too low during the ITT, with
20 negative W'_{bal} before the end of the ITT despite the absence of exhaustion. Indeed, even if the
21 levels of W'_{bal} are significantly higher than 1.5 kJ at the end of the ITT, three of our
22 participants reached negative values of W'_{bal} during the ITT (ranging from -4.9 to -12.1% of
23 W'). According to the theoretical framework of the CP model, negative values of W'_{bal} cannot
24 be reached, as exhaustion must occur because the athletes should have completely depleted
25 their W' reserves. Conversely, in our study, some of our participants were still able to sustain
26 PO higher than CP after reaching a level of W'_{bal} equal to 0, leading to largely negative values
27 for their W'_{bal} . Consequently, it seems that the inconsistencies in the CP model can also
28 induce levels of W'_{bal} that are too low during field ITT. These negative levels of W'_{bal}
29 reached during the ITT could be due to the inconsistencies of the W' and CP parameters as
30 previously explained. However, these unexpected levels of W'_{bal} during the ITT could also be
31 due to the formula used to determine the rate of recovery of W'_{bal} when PO is lower than CP.
32 Indeed, Morton and Billat's formulas presume that this rate of recovery is similar and is
33 calculated from the same formulas used for the rate of W'_{bal} expenditure when PO is higher
34 than CP (Morton and Billat 2004). Even if this assumption is mathematically possible, it

1 seems physiologically over-simplified (Skiba et al. 2012). A previous study has already
2 revealed that W'_{bal} recovery instead follows a non-linear kinetic as an exponential function of
3 time elapsed (Ferguson et al. 2010). It can also be hypothesised that the rate of recovery of
4 W'_{bal} can vary depending on the athletes' physiological characteristics (Skiba et al. 2012).
5 Consequently, Skiba et al. proposed adjusting the formula for the calculation of recovery
6 W'_{bal} (Skiba et al. 2012). However, this new formula implies the determination of a time
7 constant for W'_{bal} recovery, $\tau_{W'}$, which can only be assessed from predetermined high-
8 intensity exercise in laboratory settings. Consequently, these optimised formulas cannot be
9 used to monitor W'_{bal} during field ITT. It could be interesting for future studies to optimise or
10 simplify these formulas in order to make them completely available for the analysis of PO
11 field ITT data.

12

13 Finally, the specific field context of this study can also be its main limitation, which could
14 explain the inconsistency observed in the W'_{bal} modelling. Indeed, as the studied ITT was part
15 of an official professional race, the profile of the course was not strictly linear, with a short
16 climb in the middle of the ITT, and it was performed during a stage race. It is possible that
17 these very specific conditions, largely different from the previous studies performed in
18 laboratories, make the formulas for the determination of W'_{bal} unusable. It could be
19 interesting for future studies to use this W'_{bal} modelling again in a field context closer to
20 laboratory conditions with a perfectly flat course and the ITT performed during a one-day
21 race.

22

23 CONCLUSION

24

25 This study was the first, to the best of our knowledge, to use the CP model to predict
26 exhaustion and analyse the performance of professional cyclists during official competitive
27 field ITT. However, our results reveal that this method cannot predict the high level of fatigue
28 experienced by the athletes at the end the ITT, with W'_{bal} levels remaining at the end of the
29 exercise being significantly higher than 1.5 kJ. These limits seem to be related to some
30 inconsistencies in the determination of the CP and W' parameters, which cannot be accurately
31 determined from PO field records. Consequently, coaches and athletes must be careful when
32 trying to use this method to analyse performance during field ITT. It could be interesting for
33 future studies to improve those formulas to make them really suitable for the analysis of PO
34 field ITT data.

1 **Authors contribution**

2 TO, AG and FG designed the study. JP and FG conducted experimentations. TO analysed
3 data and wrote the manuscript. JP, AG and FG revised the manuscript. All authors read and
4 approved the content of the manuscript.

5

6 **Acknowledgments**

7 The authors would like to thank the participating cyclists for their cooperation.

8

9 **Compliance with ethical standards**

10 **Ethical approval**

11 This study was conducted in accordance with the ethical principles of the 1964 Declaration of
12 Helsinki and approved by the institutional ethics committee.

13

14 **Informed consent**

15 Prior to testing, all participants gave a voluntary written informed consent which indicates the
16 purpose, the benefits and the risks of the investigation and the possibility to stop their
17 participation at any time.

18

19 **Conflict of interest**

20 The authors declare that they have no conflict of interest.

21

1 **References**

2

3 Abbiss CR, Laursen PB (2008) Describing and understanding pacing strategies during athletic
4 competition. *Sports Med* 38:239-252

5 Atkinson G, Brunskill A (2000) Pacing strategies during a cycling time trial with simulated
6 headwinds and tailwinds. *Ergonomics* 43:1449-1460
7 doi:10.1080/001401300750003899

8 Atkinson G, Davison R, Jeukendrup A, Passfield L (2003) Science and cycling: current
9 knowledge and future directions for research. *J Sports Sci* 21:767-787
10 doi:10.1080/0264041031000102097

11 Atkinson G, Peacock O, Law M (2007a) Acceptability of power variation during a simulated
12 hilly time trial. *Int J Sports Med* 28:157-163 doi:10.1055/s-2006-924209

13 Atkinson G, Peacock O, Passfield L (2007b) Variable versus constant power strategies during
14 cycling time-trials: prediction of time savings using an up-to-date mathematical
15 model. *J Sports Sci* 25:1001-1009

16 Beelen A, Sargeant A (1991) Effect of fatigue on maximal power output at different
17 contraction velocities in humans. *Journal of Applied Physiology* 71:2332-2337

18 Bouillod A, Pinot J, Soenen F, Ouvrard T, Grappe F (2017) Dependence of the Nature of the
19 Pedaling Activity on Maximal Aerobic Power in Cycling. *Int J Sports Physiol Perform*
20 12:44-49 doi:10.1123/ijsp.2015-0489

21 Burnley M, Jones AM (2018) Power–duration relationship: Physiology, fatigue, and the limits
22 of human performance. *European journal of sport science* 18:1-12

23 Cangley P, Passfield L, Carter H, Bailey M (2011) The effect of variable gradients on pacing
24 in cycling time-trials. *Int J Sports Med* 32:132-136 doi:10.1055/s-0030-1268440

25 Dahmen T, Saupe D, Wolf S Applications of mathematical models of road cycling. In:
26 MATHMOD, Vienne, 2012.

27 de Koning JJ, Bobbert MF, Foster C (1999) Determination of optimal pacing strategy in track
28 cycling with an energy flow model. *J Sci Med Sport* 2:266-277

29 Ferguson C, Rossiter HB, Whipp BJ, Cathcart AJ, Murgatroyd SR, Ward SA (2010) Effect of
30 recovery duration from prior exhaustive exercise on the parameters of the power-
31 duration relationship. *J Appl Physiol* (1985) 108:866-874
32 doi:10.1152/jappphysiol.91425.2008

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

- 1 Foster C, Snyder AC, Thompson NN, Green MA, Foley M, Schrager M (1993) Effect of
2 pacing strategy on cycle time trial performance. *Med Sci Sports Exerc* 25:383-388
- 3 Gordon S (2005) Optimising distribution of power during a cycling time trial. *Sports*
4 *Engineering* 8:81-90
- 5 Housh DJ, Housh TJ, Bauge SM (1989) The accuracy of the critical power test for predicting
6 time to exhaustion during cycle ergometry. *Ergonomics* 32:997-1004
7 doi:10.1080/00140138908966860
- 8 Ivy JL, Res PT, Sprague RC, Widzer MO (2003) Effect of a carbohydrate-protein supplement
9 on endurance performance during exercise of varying intensity. *Int J Sport Nutr Exerc*
10 *Metab* 13:382-395
- 11 Johnson MA, Mills DE, Brown PI, Sharpe GR (2014) Prior upper body exercise reduces
12 cycling work capacity but not critical power. *Medicine & Science in Sports &*
13 *Exercise* 46
- 14 Jones AM, Vanhatalo A, Burnley M, Morton RH, Poole DC (2010) Critical power:
15 implications for determination of VO₂max and exercise tolerance. *Med Sci Sports*
16 *Exerc* 42:1876-1890
- 17 Karsten B, Hopker J, Jobson SA, Baker J, Petrigna L, Klose A, Beedie C (2017) Comparison
18 of inter-trial recovery times for the determination of critical power and W'in cycling.
19 *Journal of sports sciences* 35:1420-1425
- 20 Kordi M, Menzies C, Simpson LP (2018) Relationship between power-duration parameters
21 and mechanical and anthropometric properties of the thigh in elite cyclists. *European*
22 *journal of applied physiology* 118:637-645
- 23 Lambert EV, Speechly DP, Dennis SC, Noakes TD (1994) Enhanced endurance in trained
24 cyclists during moderate intensity exercise following 2 weeks adaptation to a high fat
25 diet. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 69:287-293
- 26 Marcora SM, Staiano W (2010) The limit to exercise tolerance in humans: mind over muscle?
27 *Eur J Appl Physiol* 109:763-770 doi:10.1007/s00421-010-1418-6
- 28 McMahon ME, Boutellier U, Smith RM, Spengler CM (2002) Hyperpnea training attenuates
29 peripheral chemosensitivity and improves cycling endurance. *J Exp Biol* 205:3937-
30 3943
- 31 Monod H, Scherrer J (1965) The work capacity of a synergic muscular group. *Ergonomics*
32 8:329-338
- 33 Morton RH, Billat LV (2004) The critical power model for intermittent exercise. *Eur J Appl*
34 *Physiol* 91:303-307 doi:10.1007/s00421-003-0987-z

- 1 Pinot J, Grappe F (2011) The record power profile to assess performance in elite cyclists. *Int J*
2 *Sports Med* 32:839-844 doi:10.1055/s-0031-1279773
- 3 Poole DC, Burnley M, Vanhatalo A, Rossiter HB, Jones AM (2016) Critical Power: An
4 Important Fatigue Threshold in Exercise Physiology. *Med Sci Sports Exerc* 48:2320-
5 2334 doi:10.1249/MSS.0000000000000939
- 6 Pritchett K, Bishop P, Pritchett R, Green M, Katica C (2009) Acute effects of chocolate milk
7 and a commercial recovery beverage on postexercise recovery indices and endurance
8 cycling performance. *Appl Physiol Nutr Metab* 34:1017-1022 doi:10.1139/H09-104
- 9 Salam H, Marcora SM, Hopker JG (2018) The effect of mental fatigue on critical power
10 during cycling exercise. *Eur J Appl Physiol* 118:85-92 doi:10.1007/s00421-017-3747-
11 1
- 12 Skiba PF, Chidnok W, Vanhatalo A, Jones AM (2012) Modeling the expenditure and
13 reconstitution of work capacity above critical power. *Med Sci Sports Exerc* 44:1526-
14 1532 doi:10.1249/MSS.0b013e3182517a80
- 15 Swain DP (1997) A model for optimizing cycling performance by varying power on hills and
16 in wind. *Med Sci Sports Exerc* 29:1104-1108
- 17 Tucker R (2009) The anticipatory regulation of performance: the physiological basis for
18 pacing strategies and the development of a perception-based model for exercise
19 performance. *Br J Sports Med* 43:392-400 doi:10.1136/bjsm.2008.050799
- 20 Vanhatalo A, Doust JH, Burnley M (2007) Determination of critical power using a 3-min all-
21 out cycling test. *Medicine and science in sports and exercise* 39:548-555
- 22 Vanhatalo A, Doust JH, Burnley M (2008) Robustness of a 3 min all-out cycling test to
23 manipulations of power profile and cadence in humans. *Exp Physiol* 93:383-390
24 doi:10.1113/expphysiol.2007.039883
- 25 Vanhatalo A, Fulford J, DiMenna FJ, Jones AM (2010) Influence of hyperoxia on muscle
26 metabolic responses and the power-duration relationship during severe - intensity
27 exercise in humans: a 31P magnetic resonance spectroscopy study. *Exp Physiol*
28 95:528-540
- 29 Vanhatalo A, Jones AM, Burnley M (2011) Application of critical power in sport. *Int J Sports*
30 *Physiol Perform* 6:128-136
- 31 Wells M, Atkinson G, Marwood S (2013) Effects of magnitude and frequency of variations in
32 external power output on simulated cycling time-trial performance. *J Sports Sci*
33 31:1639-1646 doi:10.1080/02640414.2013.794299

- 1 Wells MS, Marwood S (2016) Effects of power variation on cycle performance during
2 simulated hilly time-trials. Eur J Sport Sci 16:912-918
3 doi:10.1080/17461391.2016.1156162
- 4 Withers RT, Sherman WM, Clark DG, Esselbach PC, Nolan SR, Mackay MH, Brinkman M
5 (1991) Muscle metabolism during 30, 60 and 90 s of maximal cycling on an air-
6 braked ergometer. Eur J Appl Physiol Occup Physiol 63:354-362
- 7 Yano T, Yunoki T, Ogata H (2001) Relationship between the slow component of oxygen
8 uptake and the potential reduction in maximal power output during constant-load
9 exercise. Journal of sports medicine and physical fitness 41:165

10

2. Conditions d'utilisation de la méthode EVA pour le suivi de la performance et des mécanismes de régulation de l'effort en contre-la-montre

Notes : *L'étude ci-dessous se base sur l'analyse des données complémentaires issues de la collaboration avec l'équipe professionnelle Groupama – FDJ dans le cadre de cette thèse. Ces résultats n'ont pas encore été publiés à ce jour.*

Introduction :

Les précédentes études ont permis de mettre en évidence que la justesse des mécanismes de régulation de l'effort, évaluée à l'aide de la méthode EVA, était directement reliée à la capacité du cycliste à exploiter au maximum son potentiel physique en compétition et donc à son niveau de performance. Cependant, davantage d'études doivent être mises en place afin de déterminer dans quelle mesure ces résultats peuvent être généralisables, et si la méthode EVA ne rencontre pas certaines limites dans des conditions spécifiques liées au parcours du CLM. L'objectif de cette étude était ainsi de déterminer si les relations entre les temps passés à APO ou IPO et la $P_{méca}$ moyenne exprimée en $\%_{record-PPR}$ étaient vérifiables lors de différents CLM réalisés en compétitions officielles par des cyclistes professionnels. Nos hypothèses étaient que la $P_{méca}$ moyenne exprimée en $\%_{record-PPR}$ était fortement positivement reliée au temps passé à APO et négativement reliée au temps passé à IPO pour l'ensemble des CLM.

Méthodes :

Un total de 18 CLM en compétition officielle ont été analysés pour cette étude. Pour chaque CLM, les données de 4 à 8 cyclistes professionnels de niveau World-Tour ont été analysées, pour un total de 24 cyclistes différents. Pour chaque participant lors de chaque CLM, les données de $P_{méca}$ ont été recueillies afin de déterminer la $P_{méca}$ moyenne exprimée en $\%_{record-PPR}$ de la durée d'effort correspondante. Les temps passés à APO, IPO et REG ont également été quantifiés à l'aide de la méthode EVA telle que précédemment présentée. Les relations entre la $P_{méca}$ moyenne exprimée en $\%_{record-PPR}$ et les pourcentages de temps passé à APO et IPO ont été analysées à l'aide de coefficients de corrélations de Pearson. En raison du faible nombre de participants par CLM, aucun test paramétrique n'a pu être utilisé afin de vérifier la significativité de ces relations. En revanche, les magnitudes de ces relations ont été interprétées grâce aux tables proposées par Cohen ($r < 0,1$: aucune relation ; $r > 0,1$: relation faible ; $r > 0,3$: relation modérée ; $r > 0,5$: relation forte) (Cohen 1992).

Résultats :

L'ensemble des coefficients de corrélations entre la $P_{méca}$ moyenne en %_{record-PPR} et le pourcentage de temps passé à APO et IPO de chaque CLM sont présentés dans le **Tableau 3**.

Tableau 3. Caractéristiques du parcours et relations entre $P_{méca}$ moyenne exprimée en %_{record-PPR} et pourcentages de temps passé à APO et IPO pour l'ensemble des 18 contre-la-montre étudiés

Année	Catégorie	Etape	Profil du parcours	Distance (km)	Durée (vainqueur)	Nombre de cyclistes étudiés	Relation avec % _{record-PPR}			
							APO (r =)	Effect-size	IPO (r =)	Effect-size
CLM de moins de 7 min - Moyennes				4,8	00:05:38	5,8	0,05	Nul	-0,07	Nul
2017	2.1s	Prologue	Plat	3,8	00:04:32	4	-0,01	Nul	0,51	Fort
2016	2.WT2s	Prologue	Plat	4,0	00:05:33	7	-0,27	Faible	0,02	Nul
2015	2.WT2s	Prologue	Plat	5,1	00:05:41	8	-0,01	Nul	-0,31	Modéré
2015	2.WT1s	Prologue	Plat	5,4	00:06:04	6	0,55	Fort	0,04	Nul
2014	2.WT2s	Prologue	Plat	5,6	00:06:22	4	-0,03	Nul	-0,61	Fort
CLM de 7 à 20 min - Moyennes				11,1	00:13:13	5,9	0,02	Nul	-0,15	Faible
2016	2.HCs	Etape 3	Plat	7,0	00:09:11	6	0,03	Nul	-0,43	Modéré
2016	2.WT1s	Etape 7	Plat	10,0	00:11:08	7	0,41	Modéré	0,02	Nul
2017	2.WT1s	Etape 7	Plat	10,0	00:11:18	8	-0,02	Nul	-0,59	Fort
2015	2.WT1s	Etape 7	Plat	10,0	00:11:23	4	-0,62	Fort	-0,31	Modéré
2017	2.HCs	Etape 3	Vallonné	12,0	00:14:55	6	0,60	Fort	-0,04	Nul
2015	GT1s	Etape 1	Plat	13,8	00:14:56	5	0,14	Faible	0,03	Nul
2017	GT1s	Etape 1	Plat	14,0	00:16:04	5	-0,55	Fort	0,39	Modéré
2016	2.1s	Etape 5	Vallonné	12,0	00:16:48	6	0,16	Faible	-0,30	Modéré
CLM de plus de 20 min - Moyennes				30,4	00:39:40	5,4	0,70	Fort	-0,67	Fort
2016	2.WT2s	Etape 3	Plat	15,1	00:20:21	6	0,73	Fort	-0,68	Fort
2015	2.WT2s	Etape 6	Plat	17,3	00:23:17	5	0,38	Modéré	-0,46	Modéré
2014	2.WT2s	Etape 7	Vallonné	18,5	00:24:50	6	0,81	Fort	-0,86	Fort
2016	NCT1	1 jour	Vallonné	49,3	01:04:01	5	0,94	Fort	-0,97	Fort
2017	NCT1	1 jour	Plat	51,6	01:05:50	5	0,62	Fort	-0,37	Modéré

En gras, les relations fortes ($r < 0,5$) d'après les tables de Cohen (1992), et en italique les relations en sens inverse aux hypothèses formulées.

Pour les CLM représentant une durée d'effort inférieure à 20 minutes ($n = 13$), la majorité des relations entre la $P_{méca}$ moyenne exprimée en $\%_{record-PPR}$ et le pourcentage de temps passé à APO sont faibles ou nulles (5 relations nulles, 2 relations faibles, 1 relation modérée, 2 relations fortes, et 3 relations en sens inverse aux hypothèses formulées). De la même manière, la majorité des relations entre la $P_{méca}$ moyenne exprimée en $\%_{record-PPR}$ et le pourcentage de temps passé à IPO pour ces CLM sont nulles ou modérées (5 relations nulles, 4 relation modérées, 2 relations fortes, et 2 relations en sens inverse aux hypothèses formulées).

A l'inverse, pour la quasi-totalité des CLM représentant des durées d'effort supérieures à 20 minutes ($n = 5$), l'augmentation de la $P_{méca}$ moyenne exprimée en $\%_{record-PPR}$ est fortement reliée à l'augmentation du pourcentage de temps passé à APO (4 relations fortes et 1 relation modérée). De la même manière, pour la majorité de ces CLM, l'augmentation de la $P_{méca}$ moyenne exprimée en $\%_{record-PPR}$ est fortement reliée à la diminution du pourcentage de temps passé à IPO (3 relations fortes et 2 relations modérées). Parmi ces 5 CLM de durées supérieures à 20 minutes, les 2 CLM ayant un parcours vallonné sont ceux présentant les plus fortes relations entre la $P_{méca}$ moyenne exprimée en $\%_{record-PPR}$ et l'augmentation du temps passé à APO et la diminution de temps passé à IPO.

Discussion :

L'objectif de cette étude était de vérifier la nature des relations entre la $P_{méca}$ moyenne exprimée en $\%_{record-PPR}$ et les indices EVA sur différents types de CLM réalisés par des cyclistes professionnels. Contrairement à nos hypothèses, nos résultats montrent que la $P_{méca}$ moyenne exprimée en $\%_{record-PPR}$ serait fortement reliée à l'augmentation du temps passé à APO et à la diminution du temps passé à IPO uniquement pour les CLM d'une durée supérieure à 20 minutes.

En effet, nos résultats montrent que pour les CLM de moins de 20 minutes, les temps passés à APO et IPO ne sont pas, dans la majorité des cas, reliés à la $P_{méca}$ moyenne exprimée en $\%_{record-PPR}$. Ces résultats laissent supposer que maintenir une intensité d'effort constante ne serait pas nécessairement la stratégie d'effort optimale pour la performance lors de ces CLM de courte durée. Plusieurs études ont déjà montré que pour des efforts de très courte durée (inférieure à 2 minutes), une stratégie de type « all-out », avec un départ à intensité maximale et une $P_{méca}$ diminuant ensuite sur le reste de l'effort, serait la stratégie de gestion de l'effort optimale pour obtenir les meilleures performances (Van Ingen Schenau *et coll.*, 1992, Foster *et coll.*, 1993, Abbiss et Laursen 2008). Cependant, il convient surtout de préciser qu'en compétition

officielle, ces CLM de courte durée sont principalement parcourus à l'intérieur d'une même agglomération et présentent ainsi de nombreux virages et relances tout au long de leur parcours. Ces nombreuses relances imposeraient ainsi aux cyclistes de réaliser un effort très important afin de reprendre de la vitesse le plus rapidement possible (Abbiss et Laursen 2008), et seraient donc contradictoires avec une gestion constante de l'intensité d'exercice.

Cette faiblesse des relations entre les mécanismes de régulation de l'effort évalués à l'aide de la méthode EVA et la $P_{méca}$ moyenne exprimée en $\%_{record-PPR}$ pourrait également illustrer le fait que la gestion de l'effort représenterait un déterminant de la performance moins important pour les CLM de courte durée que pour des CLM de plus longue durée. En effet, plusieurs études ont déjà montré que les paramètres psychologiques de tolérance à la douleur (Astokorki et Mauger 2017), de leadership, d'endurance psychologique (Coquart *et coll.*, 2012a, Coquart *et coll.*, 2012b), ou encore de résistance psychologique (Coquart *et coll.*, 2012b) étaient également des déterminants importants de la performance cycliste, permettant de réduire la RPE pour un niveau d'effort donné. Or, pour les CLM de courte durée, les athlètes sélectionnent immédiatement une intensité d'exercice très importante, ce qui implique une sollicitation importante du métabolisme anaérobie et donc une RPE très élevée dès le début du CLM. En conséquence, il est possible de supposer que pour les CLM de moins de 20 minutes, la performance est encore plus fortement liée à la capacité du cycliste à diminuer cette RPE très élevée. Les paramètres psychologiques susceptibles de diminuer la RPE influenceraient donc de manière encore plus importante la performance pour les CLM de courte durée, expliquant ainsi la moindre importance des mécanismes de régulation de l'intensité d'exercice pour ce type d'effort. Ainsi, comme pour les mécanismes à l'origine de la fatigue (Froyd *et coll.*, 2016a), les paramètres psychologiques et centraux essentiels pour la performance seraient différents selon les caractéristiques, et en particulier l'intensité et la durée, de l'effort réalisé.

A l'inverse, nos résultats montrent que pour les CLM d'une durée supérieure à 20 minutes la justesse de la régulation de l'effort, évaluée à l'aide de la méthode EVA, serait un déterminant majeur de la capacité du cycliste à exploiter au mieux son potentiel physique en compétition. L'augmentation de la $P_{méca}$ moyenne exprimée en $\%_{record-PPR}$ serait systématiquement liée à l'augmentation du temps passé à APO et à la diminution du temps passé à IPO, et de manière forte dans la grande majorité des cas. Ces résultats confirment ceux des précédentes études et montrent que la méthode EVA peut être utilisée efficacement pour évaluer la justesse de la régulation de l'effort et prédire la capacité des cyclistes à exploiter au mieux leurs qualités physiques en compétition pour l'ensemble des CLM d'une durée supérieure à 20min.

Nos résultats montrent même que les relations entre indices EVA et $P_{méca}$ moyenne exprimée en %_{record-PPR} seraient renforcées lorsque le parcours du CLM serait vallonné. Ces résultats peuvent paraître surprenants dans la mesure où plusieurs études ont montré que faire varier la $P_{méca}$ dans les montées et les descentes pouvait permettre d'améliorer les performances en CLM (Cangley *et coll.*, 2011, Wells et Marwood 2016). Cependant, les différents travaux d'Atkinson *et coll.* ont déjà permis de mettre en évidence que les cyclistes avaient tendance à spontanément réaliser des variations de $P_{méca}$ trop importantes lorsque les conditions de CLM étaient variables, entraînant une diminution de la $P_{méca}$ due à la fatigue sur la fin du CLM (Atkinson et Brunskill 2000). De la même manière, ces auteurs ont déjà montré que des variations de $P_{méca}$ supérieure à 5 % dans les montées et les descentes pouvaient ne pas être supportées par les cyclistes les plus entraînés (Atkinson *et coll.*, 2007a). Ces différents résultats laissent supposer que lorsque les conditions du CLM sont variables, notamment lorsque le parcours est vallonné, la gestion de l'effort serait rendue plus difficile, augmentant le risque de variations excessives de l'intensité d'exercice néfastes pour la performance. En conséquence, sur ce type de parcours vallonné, la justesse des mécanismes de régulation de l'effort serait d'autant plus décisive pour la performance, étant nécessaire afin d'éviter ces variations de puissances exagérées et la fatigue accrue associée. La méthode EVA pourrait alors se révéler encore plus intéressante pour les entraîneurs et les athlètes sur le terrain dans ces conditions de parcours vallonné, afin de leur permettre d'optimiser leurs performances.

Conclusion et perspectives :

Cette étude met en évidence que la justesse de la régulation de l'effort, évaluée à l'aide de la méthode EVA, est fortement reliée à la capacité du cycliste à exploiter au mieux ses qualités physiques pour l'ensemble des CLM d'une durée supérieure à 20 minutes. La quantification des temps passé à APO et IPO représenteraient ainsi des outils intéressants pour aider les athlètes sur le terrain à réaliser la meilleure performance possible. Cependant, pour les CLM de plus courte durée, d'autres paramètres psychologiques pourraient avoir une influence plus importante sur la performance. Il serait intéressant pour les études futures d'analyser plus en détails ce type de CLM afin de mieux identifier ces paramètres psychologiques décisifs pour la performance lors de ces efforts de courte durée.

DISCUSSION GÉNÉRALE

L'objectif de cette thèse était d'étudier les mécanismes psycho-physiologiques impliqués dans la mobilisation et la gestion des ressources nécessaires à la réalisation d'une performance cycliste de haut niveau. Les résultats des études présentées ont ainsi permis de confirmer les hypothèses formulées, démontrant que la capacité du cycliste à exploiter au maximum ses capacités physiques en compétition était directement reliée aux mécanismes de régulation de l'intensité d'exercice et aux paramètres psychologiques associés.

Bien que les stratégies de gestion de l'effort aient déjà fait l'objet de nombreuses études depuis le milieu des années 1990, il n'existait jusqu'à présent aucune méthode permettant de réellement quantifier et objectiver les mécanismes centraux de régulation de l'intensité d'exercice pendant un effort cycliste. Le chapitre 2 de cette thèse propose ainsi une première méthode permettant de répondre à ces objectifs, grâce à l'amélioration de l'analyse EVA telle que déjà utilisée par Abbiss *et coll.* (Abbiss *et coll.*, 2010, Peiffer et Abbiss 2011). Cette méthode permet l'analyse des fluctuations observées dans le signal de $P_{méca}$, en quantifiant à la fois l'amplitude mais également la durée de l'ensemble des variations présentes dans le signal. Suite à l'analyse de plusieurs CLM réalisés en compétition officielle par des cyclistes professionnels, notre étude a permis de mettre en évidence que trois types de mécanismes de régulation de l'effort étaient observables en CLM : 1) lorsque l'athlète développe un niveau de $P_{méca}$ adapté pour le maintien d'une stratégie de gestion de l'effort constante (APO), 2) lorsque l'athlète développe un niveau de $P_{méca}$ trop élevé ou trop faible pour permettre le maintien d'une stratégie de gestion de l'effort constante (IPO), et 3) lorsque l'athlète réalise de courtes régulations d'intensité d'exercice dans le but d'éviter les efforts prolongés à intensités trop élevées ou trop faibles (REG). Les résultats de la littérature permettent de supposer que la distribution des temps passés au sein de ces différents mécanismes de régulation de l'effort aurait une influence majeure sur la performance en CLM. Le maintien d'une stratégie de gestion de l'effort constante, et donc l'augmentation du pourcentage de temps passé à APO, permettrait de diminuer la fatigue liée à la sollicitation du métabolisme anaérobie et de réduire les pertes biomécaniques dues à l'augmentation des résistances à l'avancement en présence d'importantes variations de vitesse. A l'inverse, les variations importantes de $P_{méca}$, et donc l'augmentation du temps passé à IPO, illustreraient une faible capacité à maintenir une vitesse constante et

augmenteraient les pertes biomécaniques et la fatigue (Abbiss et Laursen 2008, Wells *et coll.*, 2013). A la suite de cette étude nous avons donc proposé d'améliorer la méthode EVA afin de permettre de quantifier spécifiquement les pourcentages de temps passé à APO, IPO et REG en CLM pour l'étude des mécanismes de régulation de l'intensité d'exercice en CLM.

L'étude menée dans le cadre du chapitre 3 a directement permis de confirmer que les mécanismes de régulation de l'effort, et les paramètres psychologiques associés, avaient une influence majeure sur la performance en CLM. Les résultats de cette étude ont en effet montré que la performance lors d'un championnat national du CLM était issue de l'articulation complexe entre les qualités physiques du cycliste, sa capacité à réguler de manière optimale l'intensité d'exercice afin d'exploiter au mieux son potentiel physique, et les paramètres psychologiques qui influencent les mécanismes de régulation (**Figure 35**). La performance réalisée par les cyclistes lors d'un championnat national du CLM était notamment fortement reliée à la combinaison de leurs caractéristiques aérodynamiques et de leur capacité à développer la plus haute $P_{méca}$ moyenne possible. Cependant, cette capacité à développer la plus haute $P_{méca}$ moyenne possible ne dépendait pas uniquement de leur potentiel physique, mais était également influencée par leur capacité à réguler de manière optimale l'effort. L'analyse EVA a ainsi permis de montrer que plus les cyclistes étaient capables d'augmenter leur pourcentage de temps passé à APO et de diminuer leur pourcentage de temps passé à IPO et plus ils étaient capables d'exploiter une part importante de leur potentiel physique pendant le CLM, leur permettant ainsi de développer une plus haute $P_{méca}$ moyenne exprimée en pourcentage du record de $P_{méca}$ pour la durée d'effort concernée ($\%_{record-PPR}$). Mais au-delà de simplement démontrer l'importance des mécanismes de régulation de l'effort pour la performance en CLM, cette étude a également permis de mettre en évidence que la capacité à réguler de manière optimale l'intensité d'exercice était directement reliée aux paramètres psychologiques de l'athlète. L'augmentation du plaisir ressenti permettrait ainsi aux cyclistes de réduire leur temps passé à IPO, en facilitant leur capacité à réaliser les courtes régulations de l'effort nécessaires pour éviter les efforts prolongés à des intensités d'exercice inadaptées pour la performance. De la même manière, l'augmentation du focus attentionnel lié au contrôle de l'action ou à des éléments extérieurs pertinents pour la performance était significativement reliée à l'augmentation du pourcentage de temps passé à APO. Ainsi, une gestion optimale des pensées serait importante afin de collecter les informations nécessaires pour maintenir un niveau d'intensité d'exercice adapté tout au long du CLM. L'ensemble de ces résultats

confirment ainsi l'existence d'un modèle psychophysique de la performance cycliste en CLM, tel que défendu par de nombreux auteurs depuis le début des années 2000 (Noakes *et coll.*, 2005, St Clair Gibson *et coll.*, 2006, Tucker 2009, Marcora et Staiano 2010a, Baron *et coll.*, 2011, Noakes 2012, Blanchfield *et coll.*, 2014a, Blanchfield *et coll.*, 2014b, Brick *et coll.*, 2014, Brick *et coll.*, 2016b, Salam *et coll.*, 2018, St Clair Gibson *et coll.*, 2018).

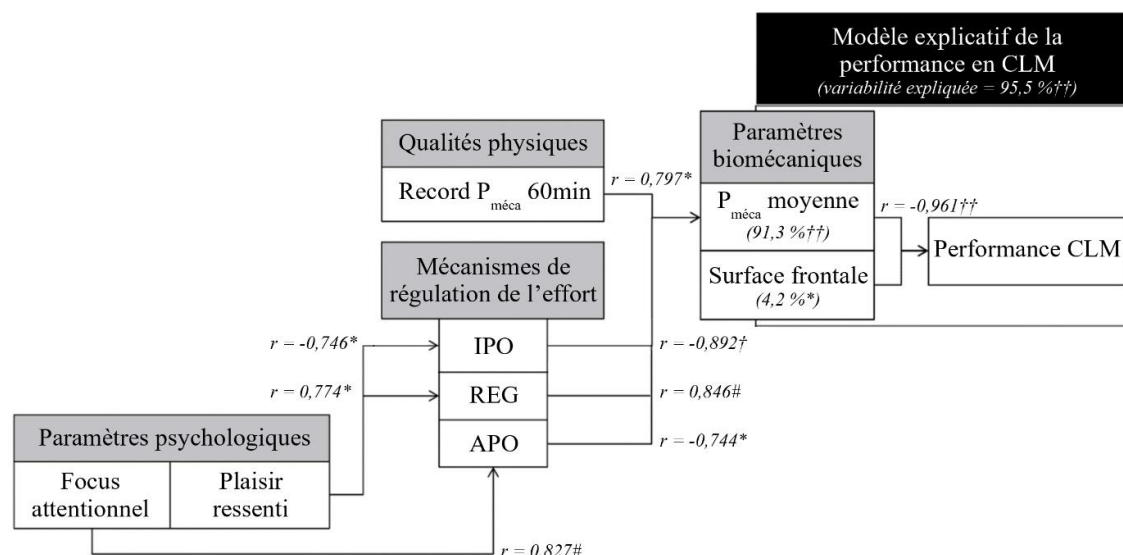


Figure 35. Proposition de modèle psychophysique de la performance lors d'un championnat national du CLM d'après les résultats du chapitre 3.

Relations significatives : * ($p < 0.05$), # ($p < 0.01$), † ($p < 0.001$), †† ($p < 0.0001$).

Les chapitres 4 et 5 de cette thèse vont encore plus loin dans cette analyse multidisciplinaire de la performance cycliste, en s'intéressant à un élément souvent négligé par les modèles psychophysiques de la performance d'endurance, à savoir l'influence du contexte spécifique de la compétition. En effet, les modèles psychophysiques de la performance se basent en général sur des études menées en laboratoire, dans des situations et avec des efforts prescrits souvent très éloignés de ceux réalisés par les athlètes en compétition officielle sur le terrain. Or les paramètres psychologiques sont nécessairement influencés par le contexte environnemental et les caractéristiques de l'effort réalisé, qui auront ensuite des répercussions sur les mécanismes de régulation de l'intensité d'exercice et l'effort physique produit. L'objectif des chapitres 4 et 5 de cette thèse était donc d'analyser la performance et les paramètres psychophysiques de l'effort lors de situations analogues à celles réellement rencontrées par les cyclistes en compétition officielle sur le terrain. Les résultats de ces deux études ont mis en évidence que, selon le contexte environnemental et les caractéristiques de l'effort réalisé, les mécanismes psychologiques de la performance sur le terrain peuvent être différents de ceux observés lors d'études menées en laboratoire.

Tout d'abord, l'étude menée dans le cadre du chapitre 4 permet de mettre en évidence que des cyclistes de niveau élite sont capables de réguler avec une grande finesse l'intensité de l'effort fourni lors de trois montées répétées à intensité maximale, dans le but d'exploiter au maximum leur potentiel physique et de n'atteindre un état d'épuisement qu'au terme de la dernière montée. Dans ce contexte et avec des athlètes possédant ce niveau d'expertise, leurs qualités remarquables de régulation de l'effort leur permettent d'employer des stratégies de gestion de l'effort similaires à celle déjà observées lors d'efforts uniques réalisés en laboratoire (Foster *et coll.*, 1993, Foster *et coll.*, 1994, Foster *et coll.*, 2004, Tucker *et coll.*, 2006, Abbiss *et coll.*, 2010, Peiffer et Abbiss 2011, Abbiss *et coll.*, 2016b, Schallig *et coll.*, 2017). A l'inverse, les résultats de l'étude menée dans le cadre du chapitre 5 montrent que la présence d'un autre cycliste lors d'un CLM en montée sur le terrain n'influence pas la performance et les paramètres psychologiques de la même manière que lors d'un CLM réalisé en laboratoire. En effet, contrairement à ce qui a déjà été observé en présence d'un adversaire en laboratoire (Corbett *et coll.*, 2012, Williams *et coll.*, 2015, Konings *et coll.*, 2017), la présence d'un équipier sur le terrain ne modifie pas significativement le focus attentionnel et l'intensité d'effort consentie par le cycliste. Ainsi, le fait de se trouver sur le terrain aurait déjà un impact important sur le focus attentionnel, rendant insignifiant l'ajout supplémentaire d'un équipier sur ces paramètres psychologiques. En revanche, la présence de l'équipier permettrait au cycliste de ressentir un plaisir plus élevé sur l'ensemble de la montée, probablement à l'origine d'un end-spurt plus important dans les derniers mètres d'ascension. L'ensemble de ces résultats permet de mettre en évidence que l'association des paramètres physiologiques et psychologiques pour l'établissement de la performance cycliste est dépendante du contexte et des caractéristiques de l'effort réalisé. Les modèles psychophysiologiques mis en place pour la prédiction de la performance cycliste se doivent donc de prendre en compte ces paramètres afin de comprendre le plus précisément possible les mécanismes à l'origine de la performance.

Les études des chapitres 3, 4 et 5 ont permis de mettre en évidence que les mécanismes de régulation de l'intensité d'exercice, évalués à l'aide de la méthode EVA, avaient une influence majeure sur la performance cycliste et pouvaient également varier selon le contexte de l'effort. En conséquence, il est possible de supposer que les variations journalières du niveau de performance cycliste souvent observables entre les différentes compétitions peuvent être en partie expliquées par des changements dans ces mécanismes de régulations de l'effort (Hickey *et coll.*, 1992, Smith *et coll.*, 2001). L'objectif des études menées dans le cadre du chapitre 6

était ainsi de vérifier ces hypothèses, en analysant les relations entre les évolutions de performance et de $P_{méca}$ moyenne et les variations des mécanismes de régulation de l'effort, évalués à l'aide de la méthode EVA, lors de plusieurs CLM réalisés par les mêmes athlètes. Les pourcentages de temps passé à APO, IPO et REG étant dépendants du parcours du CLM, des méthodologies spécifiques ont dû être utilisées afin de comparer ces indices entre différents CLM. Les résultats ont mis en évidence que les évolutions des mécanismes de régulation de l'effort pouvaient influencer la performance lors de CLM répétés de deux manières : 1) en permettant d'augmenter la vitesse de déplacement grâce à une diminution des pertes biomécaniques pour une même $P_{méca}$ moyenne lors de deux CLM réalisés sur le même parcours, et 2) en augmentant la $P_{méca}$ moyenne exprimé en $\%_{record-PPR}$ grâce à une meilleure utilisation du potentiel physique du cycliste. L'analyse EVA représenterait ainsi une piste de travail extrêmement intéressante pour les entraîneurs et les athlètes afin d'analyser les mécanismes de régulation de l'effort lors de différents CLM, et ainsi de tenter d'optimiser leurs performances. L'augmentation du pourcentage de temps passé à IPO indiquerait que le cycliste a réalisé une moins bonne régulation de l'effort sur l'ensemble du CLM, susceptible de nuire à ses performances. À l'inverse, l'augmentation du pourcentage de temps passé à APO illustrerait une meilleure capacité à maintenir une vitesse et un niveau d'effort constant, permettant aux athlètes de réduire les pertes biomécaniques et de mieux exploiter leur potentiel physique en compétition. Des améliorations doivent encore être apportées à la méthode EVA afin de la rendre plus facilement utilisable pour ce type de suivi lors de plusieurs CLM, en permettant notamment de mieux normaliser les indices de temps passé à APO et IPO en fonction du type de parcours. Cependant, ces deux études restent malgré tous les premières, à notre connaissance, à confirmer qu'une meilleure régulation de l'effort permettrait au cycliste de réduire les pertes biomécaniques dues aux variations de vitesse et de limiter l'apparition de la fatigue, comme supposé par de nombreux spécialistes en stratégies de gestion de l'effort depuis la fin des années 1990 (Foster *et coll.*, 1993, Foster *et coll.*, 1994, Abbiss et Laursen 2008).

Les différentes études menées dans le cadre de cette thèse ont ainsi permis de mettre en évidence la forte relation entre la capacité du cycliste à développer une $P_{méca}$ moyenne élevée en CLM et la justesse de la régulation de l'intensité de l'effort, évaluée à l'aide de la méthode EVA. Cependant, si cette meilleure régulation de l'effort semble permettre de réduire la fatigue accumulée, les mécanismes physiologiques derrière cette relation restent encore inexpliqués. L'objectif du chapitre 7 était donc d'identifier des pistes d'explication physiologiques

concernant l'influence de la régulation de l'effort sur le niveau de performance physique des cyclistes. Pour cela, la dépense métabolique en CLM a été analysée à l'aide du modèle de la P_{crit} permettant de quantifier le niveau de réserve anaérobie W'_{bal} pendant l'effort. L'amélioration de la régulation de l'intensité d'exercice étant censée réduire la fatigue périphérique de par une moindre sollicitation de la filière anaérobie (Abbiss et Laursen 2008), il était naturel de supposer que l'augmentation du temps passé à APO et la diminution du temps passé à IPO permettraient une consommation moins rapide de la réserve anaérobie en CLM. Malheureusement, les limites de la méthode de modélisation du W'_{bal} sur le terrain n'ont pas permis d'étudier avec précision les relations entre les mécanismes de régulation de l'effort et la dépense métabolique associée. Malgré tout, la seconde étude de ce chapitre a permis de mieux comprendre les conditions dans lesquelles cette justesse de la régulation de l'effort pouvait avoir une influence majeure sur la capacité du cycliste à exploiter au mieux ses qualités physiques. En effet, les résultats de cette étude montrent que l'augmentation du pourcentage de temps passé à APO et la diminution du pourcentage de temps passé à IPO seraient fortement reliées à la capacité du cycliste à développer une haute $P_{méca}$ moyenne exprimé en $\%_{record-PPR}$ uniquement pour les CLM d'une durée supérieure à 20 minutes. A l'inverse, pour des CLM de plus courte durée, l'influence des mécanismes de régulation de l'effort sur la $P_{méca}$ moyenne serait moindre. La justesse de la régulation de l'intensité d'exercice, évaluée à l'aide de la méthode EVA, serait donc avant tout un déterminant majeur de la performance pour les CLM d'une durée supérieure à 20 minutes, alors que sur des CLM de plus courte durée d'autres paramètres psychologiques auraient une plus grande influence sur la performance. Ces paramètres complémentaires impliqueraient ainsi une réduction de l'importance des mécanismes de régulation de l'intensité d'exercice pour la performance lors de ce type d'effort. Les résultats de cette étude montrent également que l'optimisation de la régulation de l'effort prend encore plus d'importance pour la performance lorsque le maintien d'une intensité d'effort constante est rendu difficile par des conditions environnementales variables, et notamment lorsque le parcours est vallonné. Dans ce contexte, être capable de maintenir une intensité d'effort constante avec un pourcentage élevé de temps passé à APO serait essentiel afin d'éviter des variations de $P_{méca}$ trop importantes qui seraient néfastes pour la performance.

Les résultats de ces différentes études mettent ainsi en évidence qu'un modèle psychophysique est nécessaire afin de comprendre la performance cycliste de haut-niveau (**Figure 36**). En effet, la performance est directement issue de la $P_{méca}$ développée et de

l'ensemble des résistances à l'avancement rencontrées par le cycliste. Cependant, la $P_{méca}$ développée par l'athlète ne dépendant uniquement de son potentiel physique, mais également de ses mécanismes de régulation de l'intensité d'exercice. Un cycliste capable de réguler de manière optimale son effort sera en mesure d'exploiter une part plus importante de son potentiel physique en compétition, lui permettant ainsi d'augmenter sa $P_{méca}$ développée. De plus, les paramètres psychologiques, et plus particulièrement le plaisir ressenti et le focus attentionnel, vont directement influencer la capacité du cycliste à réguler de manière optimale son effort. En conséquence, les paramètres psychologiques ont également une influence majeure sur la performance cycliste de haut-niveau, de par leurs relations avec les mécanismes de régulation de l'effort. Les variations des mécanismes de régulation de l'effort et des paramètres psychologiques associés pourraient ainsi expliquer les variations journalières de performance observables entre les différentes compétitions, malgré un niveau de potentiel physique stable. Enfin, dans le contexte de l'enchaînement des compétitions lors d'une saison cycliste de haut-niveau, l'influence des performances précédentes sur les paramètres psychologiques, et notamment sur le plaisir ressenti, amènerait ce modèle systémique à fonctionner en boucle, où les résultats précédents seraient susceptibles d'influencer en conséquence les mécanismes de régulation et donc le niveau d'utilisation des qualités physiques lors des compétitions suivantes.

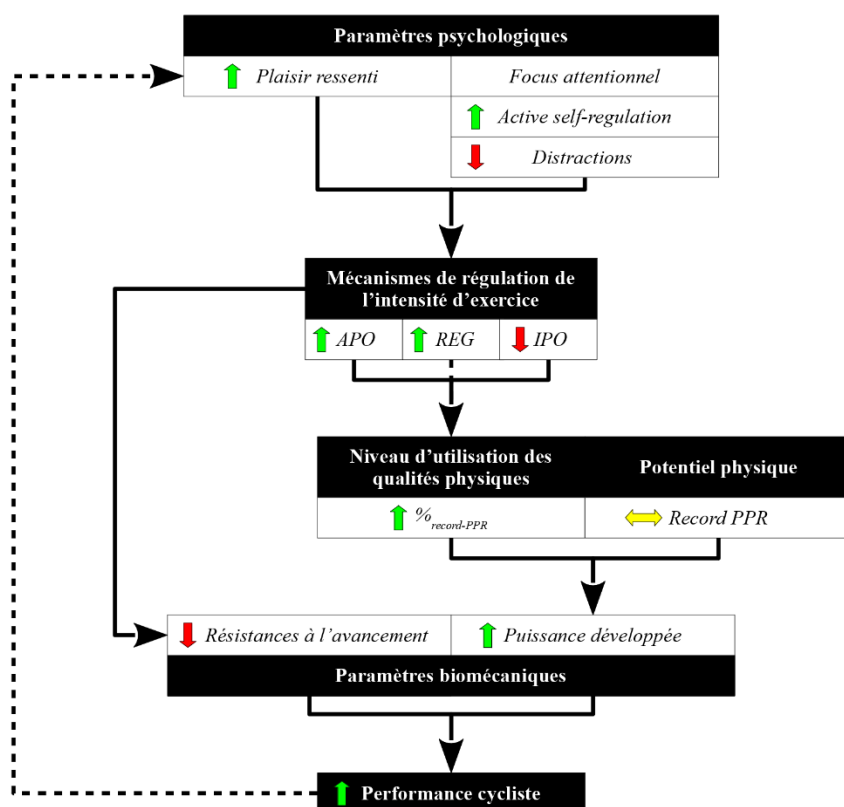


Figure 36. Mécanismes psychophysiologiques impliqués dans la réalisation d'une performance cycliste de haut-niveau.

LIMITES ET PERSPECTIVES

Les résultats des différentes études menées dans le cadre de cette thèse apportent de nouvelles connaissances scientifiques pertinentes et utilisables par les entraîneurs et les athlètes pour une meilleure compréhension des mécanismes à l'origine de la performance cycliste de haut-niveau. En premier lieu, la méthode EVA peut être utilisée par les cyclistes afin de suivre leur capacité à réguler de manière optimale l'intensité d'exercice pour exploiter au maximum leur potentiel physique en CLM. Grâce à la quantification des pourcentages de temps passé à APO et IPO, le cycliste est ainsi en mesure de déterminer s'il a été en capacité de maintenir une intensité d'effort constante pour développer la plus haute $P_{méca}$ moyenne possible, ou si au contraire il a réalisé de trop importantes variations de $P_{méca}$ susceptibles d'augmenter son niveau de fatigue en épuisant plus rapidement ses réserves énergétiques. Dans le contexte de la performance de haut-niveau, où il est extrêmement difficile d'augmenter les charges d'entraînement, où les qualités physiques des athlètes sont déjà très développées, et où les écarts de performance entre les meilleurs sont souvent minimales (Paton et Hopkins 2006), l'utilisation d'une telle méthode pour optimiser les mécanismes de régulation de l'effort en CLM pourrait avoir un impact majeur sur la performance finale. De plus, les résultats de nos différentes études montrent également que les paramètres psychologiques tels que le plaisir ressenti ou le focus attentionnel jouent, de par leur influence sur ces mécanismes de régulation de l'intensité d'exercice, un rôle essentiel dans l'établissement d'une performance. Les entraîneurs et les athlètes sur le terrain ne doivent donc pas négliger l'importance de ces paramètres et doivent tenter de les optimiser afin d'améliorer leurs performances.

Bien qu'ils intègrent à la fois des connaissances liées aux domaines de la biomécanique, de la physiologie et de la psychologie du sport, ces travaux méritent d'être poursuivis car de nombreuses zones d'ombres restent encore inexplorées dans le vaste champ que représente la performance cycliste de haut-niveau. Tout d'abord, comme évoqué précédemment, nos résultats montrent que les mécanismes de régulation de l'effort influencent principalement la performance en CLM pour des durées d'effort supérieures à 20 minutes. D'autres études doivent donc être menées afin de définir les paramètres psychologiques qui seront susceptibles d'avoir un impact plus important sur la performance pour des efforts d'une durée inférieure. Plusieurs études ont déjà montré que d'autres paramètres psychologiques tels que l'anxiété (McCann *et coll.*, 1992, Paquet *et coll.*, 2008), la tolérance à la douleur (Astokorki et Mauger

2017), l'endurance psychologique ou encore le leadership (Coquart *et coll.*, 2012a, Coquart *et coll.*, 2012b) pouvaient également être des déterminants majeurs de la performance cycliste. Pour nos études menées dans un contexte de compétition officielle sur le terrain nous avons choisi d'analyser uniquement les deux paramètres psychologiques qui d'après la littérature sont les plus susceptibles d'influencer les mécanismes de régulation de l'effort (à savoir le plaisir ressenti et le focus attentionnel) (Baron *et coll.*, 2011, Brick *et coll.*, 2014, Baron *et coll.*, 2015, Brick *et coll.*, 2016b) afin d'éviter au maximum de perturber les routines de préparation habituelles des athlètes. Cependant, il serait intéressant pour les études futures d'intégrer l'évaluation d'une palette plus large d'indices psychologiques, afin d'identifier l'ensemble des paramètres mentaux susceptibles d'influencer les mécanismes de régulation de l'effort et la performance en cyclisme. De plus, la quasi-totalité des études ont été réalisées dans le contexte spécifique du CLM, or les courses cyclistes de haut-niveau se courent également sous la forme de courses en peloton. Il est très probable que cet environnement très particulier, avec la présence de nombreux adversaires et coéquipiers, ait également une influence majeure sur les mécanismes de régulation de l'effort et sur les paramètres psychologiques du cycliste. De nombreuses études doivent donc encore être conduites pour mieux comprendre le système synergique reliant les principaux déterminants de la performance chez les cyclistes de haut-niveau dans différentes conditions de compétitions.

De la même manière, si nos travaux ont permis d'analyser en détail les mécanismes de régulation de l'intensité d'exercice grâce à l'analyse des fluctuations de $P_{méca}$, les mécanismes neuromusculaires et cérébraux à l'origine de ces paramètres n'ont pas été étudiés au cours de cette thèse. Cette décision de ne pas s'intéresser aux mécanismes internes liés à la régulation de l'effort a principalement été prise pour des raisons techniques. L'analyse des réponses neuromusculaires ou l'investigation des régions corticales nécessitant l'utilisation de techniques complexes accessibles uniquement en laboratoire, il était impossible de coupler de telles mesures avec l'étude de la performance cycliste dans un contexte de terrain. Cependant, avec le développement constant des nouvelles technologies facilitant la recherche scientifique, de nouvelles méthodes voient désormais le jour afin de permettre l'étude de ces mécanismes cérébraux et neuromusculaires dans des conditions de plus en plus proches de la pratique réelle sur le terrain (Enders *et coll.*, 2016, Puel *et coll.*, 2016, Hurst *et coll.*, 2017, Doyle-Baker *et coll.*, 2018). Il serait donc intéressant dans les années à venir de coupler l'étude des mécanismes de régulation de l'intensité d'exercice tel qu'effectuée dans le cadre de cette thèse à l'analyse des aires cérébrales sollicitées ou à la quantification de la fatigue centrale et périphérique

produite. Cette approche neurophysiologique de la performance cycliste permettrait ainsi d'expliquer plus en détail les liens profonds existant entre performance, mécanismes de régulation de l'effort et paramètres psychologiques.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les différents modèles psychophysiologiques développés depuis la fin des années 1990 ont mis en évidence que l'étude de la performance sportive en endurance devait intégrer l'ensemble des paramètres susceptibles d'influencer l'intensité d'effort produite, et en particulier les paramètres psychologiques influençant la commande centrale. Les différentes études menées au cours de cette thèse mettent en évidence que la performance en cyclisme dans des conditions d'effort type CLM serait directement dépendante de la capacité du cycliste à développer la plus haute $P_{méca}$ moyenne, elle-même directement reliée à la capacité à réguler de manière optimale l'intensité d'exercice pendant l'effort. En conséquence, les paramètres psychologiques, et notamment le plaisir ressenti et le focus attentionnel, auraient également une influence majeure sur la performance, de par leur impact sur les mécanismes centraux de régulation de l'effort. Nos principaux résultats montrent que les paramètres centraux influencent directement la capacité du cycliste à exploiter au mieux ses qualités physiques en compétition. De plus, ces paramètres centraux varieraient également entre les compétitions et pourraient ainsi expliquer les variations journalières de performance malgré un niveau de potentiel physique stable. Nos travaux montrent également que les paramètres psychologiques et les mécanismes de régulation de l'intensité d'exercice sont dépendant du contexte environnemental et des caractéristiques de l'effort fourni. En conséquence, l'étude de la performance en CLM doit non-seulement prendre en compte les paramètres mentaux influençant la commande motrice, mais doit également chercher à reproduire le plus fidèlement possible les contraintes et le contexte rencontré par les athlètes de haut-niveau lors de compétitions officielles sur le terrain afin de permettre une compréhension complète des mécanismes physiologiques et psychologiques en interaction pour l'établissement de la performance.

BIBLIOGRAPHIE

Abbiss, C. R. et Laursen, P. B. (2008). "Describing and understanding pacing strategies during athletic competition." *Sports Med*, 38(3): 239-252.

Abbiss, C. R., Straker, L., Quod, M. J., Martin, D. T. et Laursen, P. B. (2010). "Examining pacing profiles in elite female road cyclists using exposure variation analysis." *Br J Sports Med*, 44(6): 437-442.

Abbiss, C. R., Thompson, K. G., Lipski, M., Meyer, T. et Skorski, S. (2016a). "Difference in pacing between time- and distance-based time trials in trained cyclists." *Int J Sports Physiol Perform*, 11(8): 1018-1023.

Abbiss, C. R., Thompson, K. G., Lipski, M., Meyer, T. et Skorski, S. (2016b). "Pacing Differs Between Time- and Distance-Based Time Trials in Trained Cyclists." *Int J Sports Physiol Perform*.

Aboodarda, S. J., Mira, J., Floreani, M., Jaswal, R., Moon, S. J., Amery, K., Rupp, T. et Millet, G. Y. (2018). "Effects of endurance cycling training on neuromuscular fatigue in healthy active men. Part II: Corticospinal excitability and voluntary activation." *Eur J Appl Physiol*: 1-11.

Aisbett, B., Le Rossignol, P., McConell, G. K., Abbiss, C. R. et Snow, R. (2009a). "Effects of starting strategy on 5-min cycling time-trial performance." *J Sports Sci*, 27(11): 1201-1209.

Aisbett, B., Lerossignol, P., McConell, G. K., Abbiss, C. R. et Snow, R. (2009b). "Influence of all-out and fast start on 5-min cycling time trial performance." *Med Sci Sports Exerc*, 41(10): 1965-1971.

Allen, D. G., Lamb, G. D. et Westerblad, H. (2008). "Skeletal muscle fatigue: cellular mechanisms." *Physiol Rev*, 88(1): 287-332.

Amann, M. (2011). "Central and peripheral fatigue: interaction during cycling exercise in humans." *Med Sci Sports Exerc*, 43(11): 2039-2045.

Amann, M. (2012). "Significance of Group III and IV muscle afferents for the endurance exercising human." *Clin Exp Pharmacol Physiol*, 39(9): 831-835.

Amann, M., Blain, G. M., Proctor, L. T., Sebranek, J. J., Pegelow, D. F. et Dempsey, J. A. (2010). "Group III and IV muscle afferents contribute to ventilatory and cardiovascular response to rhythmic exercise in humans." *J Appl Physiol (1985)*, 109(4): 966-976.

Amann, M., Blain, G. M., Proctor, L. T., Sebranek, J. J., Pegelow, D. F. et Dempsey, J. A. (2011). "Implications of group III and IV muscle afferents for high-intensity endurance exercise performance in humans." *J Physiol*, 589(Pt 21): 5299-5309.

Amann, M. et Dempsey, J. A. (2008). "Locomotor muscle fatigue modifies central motor drive in healthy humans and imposes a limitation to exercise performance." *J Physiol*, 586(1): 161-173.

Amann, M., Eldridge, M. W., Lovering, A. T., Stickland, M. K., Pegelow, D. F. et Dempsey, J. A. (2006a). "Arterial oxygenation influences central motor output and exercise performance via effects on peripheral locomotor muscle fatigue in humans." *J Physiol*, 575(Pt 3): 937-952.

Amann, M. et Kayser, B. (2009). "Nervous system function during exercise in hypoxia." *High Alt Med Biol*, 10(2): 149-164.

Amann, M. et Light, A. R. (2015). "From Petri dish to human: new insights into the mechanisms mediating muscle pain and fatigue, with implications for health and disease." *Experimental physiology*, 100(9): 989-990.

Amann, M., Marcora, S. M., Nybo, L., Duhamel, T. A., Noakes, T. D., Jaquinandi, V., Saumet, J. L., Abraham, P., Ameredes, B. T. et Burnley, M. (2008a). "Commentaries on Viewpoint: Fatigue mechanisms determining exercise performance: Integrative physiology is systems physiology." *J Appl Physiol (1985)*, 104(5): 1543-1546.

Amann, M., Pegelow, D. F., Jacques, A. J. et Dempsey, J. A. (2007a). "Inspiratory muscle work in acute hypoxia influences locomotor muscle fatigue and exercise performance of healthy humans." *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*, 293(5): R2036-2045.

- Amann, M., Proctor, L. T., Sebranek, J. J., Eldridge, M. W., Pegelow, D. F. et Dempsey, J. A.** (2008b). "Somatosensory feedback from the limbs exerts inhibitory influences on central neural drive during whole body endurance exercise." *J Appl Physiol* (1985), 105(6): 1714-1724.
- Amann, M., Proctor, L. T., Sebranek, J. J., Pegelow, D. F. et Dempsey, J. A.** (2009). "Opioid-mediated muscle afferents inhibit central motor drive and limit peripheral muscle fatigue development in humans." *J Physiol*, 587(1): 271-283.
- Amann, M., Romer, L. M., Pegelow, D. F., Jacques, A. J., Hess, C. J. et Dempsey, J. A.** (2006b). "Effects of arterial oxygen content on peripheral locomotor muscle fatigue." *J Appl Physiol* (1985), 101(1): 119-127.
- Amann, M., Romer, L. M., Subudhi, A. W., Pegelow, D. F. et Dempsey, J. A.** (2007b). "Severity of arterial hypoxaemia affects the relative contributions of peripheral muscle fatigue to exercise performance in healthy humans." *J Physiol*, 581(Pt 1): 389-403.
- Amann, M. et Secher, N. H.** (2010a). "Last Word on Point: Counterpoint: Afferent feedback from fatigued locomotor muscles is an important determinant of endurance exercise performance." *J Appl Physiol* (1985), 108(2): 469-469.
- Amann, M. et Secher, N. H.** (2010b). "Point: Afferent feedback from fatigued locomotor muscles is an important determinant of endurance exercise performance." *J Appl Physiol* (1985), 108(2): 452-454.
- Amann, M., Sidhu, S. K., Weavil, J. C., Mangum, T. S. et Venturelli, M.** (2015). "Autonomic responses to exercise: group III/IV muscle afferents and fatigue." *Auton Neurosci*, 188: 19-23.
- Amann, M., Venturelli, M., Ives, S. J., McDaniel, J., Layec, G., Rossman, M. J. et Richardson, R. S.** (2013). "Peripheral fatigue limits endurance exercise via a sensory feedback-mediated reduction in spinal motoneuronal output." *J Appl Physiol* (1985), 115(3): 355-364.
- Angius, L., Hopker, J. G., Marcora, S. M. et Mauger, A. R.** (2014). Transcranial current direct stimulation reduces cold pain perception but not acute muscle pain. Conférence "Physiology 2014", Londres, Physiological society.

- Angius, L., Hopker, J. G., Marcora, S. M. et Mauger, A. R.** (2015a). "The effect of transcranial direct current stimulation of the motor cortex on exercise-induced pain." *Eur J Appl Physiol*, 115(11): 2311-2319.
- Angius, L., Mauger, A. R., Hopker, J., Pascual-Leone, A., Santarnecchi, E. et Marcora, S. M.** (2018). "Bilateral extracephalic transcranial direct current stimulation improves endurance performance in healthy individuals." *Brain Stimul*, 11(1): 108-117.
- Angius, L., Pageaux, B., Hopker, J., Marcora, S. M. et Mauger, A. R.** (2016). "Transcranial direct current stimulation improves isometric time to exhaustion of the knee extensors." *Neuroscience*, 339: 363-375.
- Angius, L., Pageaux, B., Hopker, J. G. et Marcora, S. M.** (2013). Muscle ischemic preconditioning reduces feedback from group iii and iv muscle afferents. European College of Sports Sciences, Barcelone.
- Angius, L., Pageaux, B., Hopker, J. G., Marcora, S. M. et Mauger, A. R.** (2015b). Transcranial direct current stimulation improves isometric time to exhaustion performance of lower limbs. Conférence "Physiology 2015", Cardiff, Physiological society.
- Ansley, L., Rauch, L. et St Clair Gibson, A.** (2004). "The effect of cadence on power output, oxygen consumption and the incidence of the plateau phenomenon during maximal incremental exercise." *J Sports Sci*.
- Astokorki, A. et Mauger, A. R.** (2017). "Tolerance of exercise-induced pain at a fixed rating of perceived exertion predicts time trial cycling performance." *Scand J Med Sci Sports*, 27(3): 309-317.
- Atkinson, G. et Brunskill, A.** (2000). "Pacing strategies during a cycling time trial with simulated headwinds and tailwinds." *Ergonomics*, 43(10): 1449-1460.
- Atkinson, G., Davison, R., Jeukendrup, A. et Passfield, L.** (2003). "Science and cycling: current knowledge and future directions for research." *J Sports Sci*, 21(9): 767-787.
- Atkinson, G. et Nevill, A. M.** (2001). "Selected issues in the design and analysis of sport performance research." *J Sports Sci*, 19(10): 811-827.

- Atkinson, G., Peacock, O. et Law, M.** (2007a). "Acceptability of power variation during a simulated hilly time trial." *Int J Sports Med*, 28(2): 157-163.
- Atkinson, G., Peacock, O. et Passfield, L.** (2007b). "Variable versus constant power strategies during cycling time-trials: prediction of time savings using an up-to-date mathematical model." *J Sports Sci*, 25(9): 1001-1009.
- Baden, D. A., McLean, T. L., Tucker, R., Noakes, T. D. et St Clair Gibson, A.** (2005). "Effect of anticipation during unknown or unexpected exercise duration on rating of perceived exertion, affect, and physiological function." *Br J Sports Med*, 39(10): 742-746.
- Baghurst, T., Thierry, G. et Holder, T.** (2004). "Evidence for a relationship between attentional styles and effective cognitive strategies during performance." *Athletic Insight*, 6(1): 36-51.
- Balmer, J., Davison, R. C. et 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.
- Barbosa, T. C., Vianna, L. C., Fernandes, I. A., Prodel, E., Rocha, H. N., Garcia, V. P., Rocha, N. G., Secher, N. H. et Nobrega, A. C.** (2016). "Intrathecal fentanyl abolishes the exaggerated blood pressure response to cycling in hypertensive men." *J Physiol*, 594(3): 715-725.
- Baron, B., Guilloux, B., Begue, M. et Uriac, S.** (2015). "Emotional responses during repeated sprint intervals performed on level, downhill and uphill surfaces." *J Sports Sci*, 33(5): 476-486.
- Baron, B., Moullan, F., Deruelle, F. et 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.
- Barwood, M. J., Corbett, J., Wagstaff, C. R., McVeigh, D. et Thelwell, R. C.** (2015). "Improvement of 10-km time-trial cycling with motivational self-talk compared with neutral self-talk." *Int J Sports Physiol Perform*, 10(2): 166-171.
- Bassett, D. R. J. et Howley, E. T.** (1997). "Maximal oxygen uptake: "classical" versus "contemporary" viewpoints." *Med Sci Sports Exerc*, 29(5): 591-603.

Beaudoin, C. M., Crews, D. J. et Morgan, D. W. (1998). "Influence of psychogenic factors during a prolonged maximal run." *J Sport Behaviour*, 21(4): 377.

Beaulieu, C. (2004). Etude et conception d'une pédale dynamométrique à 5 degrés de liberté. Optimisation de structures composites carbone époxyde, Thèse soutenue publiquement à l'Université de Franche-Comté.

Bentley, D. J., Wilson, G. J., Davie, A. J. et Zhou, S. (1998). "Correlations between peak power output, muscular strength and cycle time trial performance in triathletes." *J Sports Med Phys Fitness*, 38(3): 201-207.

Bertollo, M., Selenia, D. F., Lamberti, V., Ripari, P. et Machado, V. (2015). "To focus or not to focus: Is attention on the core components of action beneficial for cycling performance?" *Sport Psychol*, 29(2): 110-119.

Bertucci, W. (2003). Etude de l'interface homme-machine en cyclisme à partir de l'analyse biomécanique du pédalage et de la réalisation d'un ergomètre, Thèse soutenue publiquement à l'Université de Franche-Comté.

Bigland-Ritchie, B. (1981). "EMG/force relations and fatigue of human voluntary contractions." *Exerc Sport Sci Rev*, 9(1): 75-117.

Bigland-Ritchie, B., Jones, D. A., Hosking, G. P. et Edwards, R. H. (1978). "Central and peripheral fatigue in sustained maximum voluntary contractions of human quadriceps muscle." *Clin Sci Mol Med*, 54(6): 609-614.

Bigliassi, M. (2015). "Corollary discharges and fatigue-related symptoms: the role of attentional focus." *Front Psychol*, 6: 1002.

Bishop, D., Jenkins, D. G. et Mackinnon, L. T. (1998). "The relationship between plasma lactate parameters, W_{peak} and 1-h cycling performance in women." *Med Sci Sports Exerc*, 30(8): 1270-1275.

Blain, G. M., Mangum, T. S., Sidhu, S. K., Weavil, J. C., Hureau, T. J., Jessop, J. E., Bledsoe, A. D., Richardson, R. S. et Amann, M. (2016). "Group III/IV muscle afferents limit the intramuscular metabolic perturbation during whole body exercise in humans." *J Physiol*, 594(18): 5303-5315.

- Blanchfield, A., Hardy, J. et Marcora, S.** (2014a). "Non-conscious visual cues related to affect and action alter perception of effort and endurance performance." *Front Hum Neurosci*, 8: 967.
- Blanchfield, A. W., Hardy, J., De Morree, H. M., Staiano, W. et Marcora, S. M.** (2014b). "Talking yourself out of exhaustion: the effects of self-talk on endurance performance." *Med Sci Sports Exerc*, 46(5): 998-1007.
- Bongiovanni, L. G. et Hagbarth, K. E.** (1990). "Tonic vibration reflexes elicited during fatigue from maximal voluntary contractions in man." *J Physiol*, 423(1): 1-14.
- Borg, G.** (1985). An introduction to Borg's RPE-scale. New York, New York, Mouvement Publications.
- Borg, G.** (1998). Borg's perceived exertion and pain scales. Champaign, Illinois, Human kinetics.
- Borg, G., Ljunggren, G. et 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." *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 54(4): 343-349.
- Borg, G. A.** (1982). "Psychophysical bases of perceived exertion." *Med Sci Sports Exerc*, 14(5): 377-381.
- Bosquet, L., Leger, L. et Legros, P.** (2002). "Methods to determine aerobic endurance." *Sports Med*, 32(11): 675-700.
- Bouillod, A.** (2017). Etude de la position en cyclisme à travers l'interface homme-machine, Thèse soutenue publiquement à l'Université de Bourgogne Franche-Comté.
- Brehm, J. W. et Self, E. A.** (1989). "The intensity of motivation." *Annu Rev Psychol*, 40(1): 109-131.
- Brewer, B. W., Van Raalte, J. L. et Linder, D.** (1996). Attentional focus and endurance performance. Applied research in coaching and athletics annual 1996. **Simpson, W. K., LeUnes, A. et Picou, J. S.** Boston, Massachusetts, American Press: 1-14.

- Brick, N. E., Campbell, M. J., Metcalfe, R. S., Mair, J. L. et Macintyre, T. E.** (2016a). "Altering Pace Control and Pace Regulation: Attentional Focus Effects during Running." *Med Sci Sports Exerc*, 48(5): 879-886.
- Brick, N. E., MacIntyre, T. E. et Campbell, M. J.** (2014). "Attentional focus in endurance activity: new paradigms and future directions." *Int Rev Sport Exerc Psychol*, 7(1): 106-134.
- Brick, N. E., MacIntyre, T. E. et Campbell, M. J.** (2015). "Metacognitive processes in the self-regulation of performance in elite endurance runners." *Psychol Sport Exerc*, 19: 1-9.
- Brick, N. E., MacIntyre, T. E. et Campbell, M. J.** (2016b). "Thinking and Action: A Cognitive Perspective on Self-Regulation during Endurance Performance." *Front Physiol*, 7: 159.
- Brownstone, R. M.** (2006). "Beginning at the end: repetitive firing properties in the final common pathway." *Prog Neurobiol*, 78(3-5): 156-172.
- Broxterman, R. M., Richardson, R. S. et Amann, M.** (2015). "Less peripheral fatigue after prior exercise is not evidence against the regulation of the critical peripheral fatigue threshold." *J Appl Physiol (1985)*, 119(12): 1520-1520.
- Buchheit, M. et Laursen, P. B.** (2013). "High-intensity interval training, solutions to the programming puzzle. Part II: anaerobic energy, neuromuscular load and practical applications." *Sports Med*, 43(10): 927-954.
- Burnley, M., Vanhatalo, A., Fulford, J. et Jones, A. M.** (2010). "Similar metabolic perturbations during all-out and constant force exhaustive exercise in humans: a ³¹P magnetic resonance spectroscopy study." *Exp Physiol*, 95(7): 798-807.
- Calbet, J. A., Boushel, R., Radegran, G., Sondergaard, H., Wagner, P. D. et Saltin, B.** (2003a). "Determinants of maximal oxygen uptake in severe acute hypoxia." *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*, 284(2): R291-303.
- Calbet, J. A., De Paz, J. A., Garatachea, N., Cabeza de Vaca, S. et Chavarren, J.** (2003b). "Anaerobic energy provision does not limit Wingate exercise performance in endurance-trained cyclists." *J Appl Physiol (1985)*, 94(2): 668-676.

Cameron, L. D. et Leventhal, H. (2003). The self-regulation of health and illness behaviour. Londres, Psychology Press.

Cangley, P., Passfield, L., Carter, H. et Bailey, M. (2011). "The effect of variable gradients on pacing in cycling time-trials." *Int J Sports Med*, 32(2): 132-136.

Capostagno, B., Lambert, M. I. et Lamberts, R. P. (2014). "Standardized versus customized high-intensity training: effects on cycling performance." *Int J Sports Physiol Perform*, 9(2): 292-301.

Chaudhuri, A. et Behan, P. O. (2000). "Fatigue and basal ganglia." *J Neurol Sci*, 179(S 1-2): 34-42.

Chicharro, J. L., Hoyos, J. et Lucia, A. (2000). "Effects of endurance training on the isocapnic buffering and hypocapnic hyperventilation phases in professional cyclists." *Br J Sports Med*, 34(6): 450-455.

Chidnok, W., DiMenna, F. J., Fulford, J., Bailey, S. J., Skiba, P. F., Vanhatalo, A. et Jones, A. M. (2013). "Muscle metabolic responses during high-intensity intermittent exercise measured by 31P-MRS: relationship to the critical power concept." *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*, 305(9): R1085-R1092.

Clingman, J. M. et Hilliard, D. V. (1990). "Race walkers quicken their pace by tuning in, not stepping out." *Sport Psychol*, 4(1): 25-32.

Cohen, J. (1992). "A power primer." *Psychol Bull*, 112(1): 155-159.

Connolly, C. et Janelle, C. (2003). "Attentional strategies in rowing: Performance, perceived exertion, and gender considerations." *J Appl Sport Psychol*, 15(3): 195-212.

Connolly, C. T. et Tenenbaum, G. (2010). "Exertion–attention–flow linkage under different workloads." *J Appl Social Psychol*, 40(5): 1123-1145.

Coquart, J., Grosbois, J.-M., Nycz, M., Dufour, Y., Bart, F. et Garcin, M. (2012a). "Relation entre la perception de l'effort au seuil d'oxydation maximale des lipides (LIPOXmax), les réponses physiologiques et le profil psychologique de cyclistes compétiteurs." *Sci Sports*, 27(4): 208-214.

- Coquart, J. B., Dufour, Y., Gros Lambert, A., Matran, R. et Garcin, M.** (2012b). "Relationships between psychological factors, RPE and time limit estimated by teleoanticipation." *Sport Psychol*, 26(3): 359-374.
- Corbett, J., Barwood, M. J., Ouzounoglou, A., Thelwell, R. et Dicks, M.** (2012). "Influence of competition on performance and pacing during cycling exercise." *Med Sci Sports Exerc*, 44(3): 509-515.
- Costill, D. L., Thomason, H. et Roberts, E.** (1973). "Fractional utilization of the aerobic capacity during distance running." *Med Sci Sports*, 5(4): 248-252.
- Cotel, F., Exley, R., Cragg, S. J. et Perrier, J. F.** (2013). "Serotonin spillover onto the axon initial segment of motoneurons induces central fatigue by inhibiting action potential initiation." *Proc Natl Acad Sci U S A*, 110(12): 4774-4779.
- Coutts, A. J.** (2017). "Challenges in Developing Evidence-Based Practice in High-Performance Sport." *Int J Sports Physiol Perform*, 12(6): 717-718.
- Couture, R., Tihanyi, J. et St Aubin, M.** (2003). "Better distance-swim performance through complimentary cognitive strategy." *Sport J*, 6: 1-6.
- Couture, R. T., Jerome, W. et Tihanyi, J.** (1999). "Can associative and dissociative strategies affect the swimming performance of recreational swimmers?" *Sport Psychol*, 13(3): 334-343.
- Coyle, E. F., Coggan, A. R., Hopper, M. K. et Walters, T. J.** (1988). "Determinants of endurance in well-trained cyclists." *J Appl Physiol* (1985), 64(6): 2622-2630.
- Coyle, E. F., Feltner, M. E., Kautz, S. A., Hamilton, M. T., Montain, S. J., Baylor, A. M., Abraham, L. D. et Petrek, G. W.** (1991). "Physiological and biomechanical factors associated with elite endurance cycling performance." *Med Sci Sports Exerc*, 23(1): 93-107.
- Crews, D. J.** (1992). "Psychological state and running economy." *Med Sci Sports Exerc*, 24(4): 475-482.
- D'Amico, J., Butler, A., Butler, J., Gandevia, S. et Taylor, J.** (2015). Activation of 5HT1A receptors: a plausible contributor to central fatigue. Congress of the European College of Sport Science, Malmö.

Dahmen, T., Saupe, D. et Wolf, S. (2012). Applications of mathematical models of road cycling. MATHMOD, Vienne.

Damasio, A. R., Grabowski, T. J., Bechara, A., Damasio, H., Ponto, L. L., Parvizi, J. et Hichwa, R. D. (2000). "Subcortical and cortical brain activity during the feeling of self-generated emotions." *Nat Neurosci*, 3(10): 1049-1056.

Day, J. R., Rossiter, H. B., Coats, E. M., Skasick, A. et Whipp, B. J. (2003). "The maximally attainable VO₂ during exercise in humans: the peak vs. maximum issue." *J Appl Physiol* (1985), 95(5): 1901-1907.

de Koning, J. J., Foster, C., Bakkum, A., Kloppenburg, S., Thiel, C., Joseph, T., Cohen, J. et Porcari, J. P. (2011). "Regulation of pacing strategy during athletic competition." *PLoS One*, 6(1): e15863.

de Morree, H. M., Klein, C. et Marcora, S. M. (2012). "Perception of effort reflects central motor command during movement execution." *Psychophysiology*, 49(9): 1242-1253.

de Morree, H. M., Klein, C. et Marcora, S. M. (2014). "Cortical substrates of the effects of caffeine and time-on-task on perception of effort." *J Appl Physiol* (1985), 117(12): 1514-1523.

de Morree, H. M. et Marcora, S. M. (2013). "Effects of isolated locomotor muscle fatigue on pacing and time trial performance." *Eur J Appl Physiol*, 113(9): 2371-2380.

Decorte, N., Lafaix, P. A., Millet, G. Y., Wuyam, B. et Verges, S. (2012). "Central and peripheral fatigue kinetics during exhaustive constant-load cycling." *Scand J Med Sci Sports*, 22(3): 381-391.

Dempsey, J. A., Amann, M., Romer, L. M. et Miller, J. D. (2008). "Respiratory system determinants of peripheral fatigue and endurance performance." *Med Sci Sports Exerc*, 40(3): 457-461.

Dempsey, J. A., Blain, G. M. et Amann, M. (2014). "Are type III–IV muscle afferents required for a normal steady-state exercise hyperpnoea in humans?" *Journal Physiol*, 592(3): 463-474.

- Dettmers, C., Lemon, R. N., Stephan, K. M., Fink, G. R. et Frackowiak, R. S.** (1996). "Cerebral activation during the exertion of sustained static force in man." *Neuroreport*, 7(13): 2103-2110.
- di Prampero, P. E., Cortili, G., Mognoni, P. et Saibene, F.** (1979). "Equation of motion of a cyclist." *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol*, 47(1): 201-206.
- Doyle-Baker, D., Temesi, J., Medysky, M. E., Holash, R. J. et Millet, G. Y.** (2018). "An Innovative Ergometer to Measure Neuromuscular Fatigue Immediately after Cycling." *Med Sci Sports Exerc*, 50(2): 375-387.
- Duc, S.** (2005). Analyse de l'activité musculaire du pédalage en relation avec la performance en cyclisme, Thèse soutenue publiquement à l'Université de Franche-Comté.
- Duchateau, J. et Hainaut, K.** (1993). "Behaviour of short and long latency reflexes in fatigued human muscles." *J Physiol*, 471(1): 787-799.
- Duffield, R., Green, R., Castle, P. et Maxwell, N.** (2010). "Precooling can prevent the reduction of self-paced exercise intensity in the heat." *Med Sci Sports Exerc*, 42(3): 577-584.
- Duhamel, T. A., Green, H. J., Sandiford, S. D., Perco, J. G. et Ouyang, J.** (2004). "Effects of progressive exercise and hypoxia on human muscle sarcoplasmic reticulum function." *J Appl Physiol* (1985), 97(1): 188-196.
- Earnest, C. P., Foster, C., Hoyos, J., Muniesa, C. A., Santalla, A. et Lucia, A.** (2009). "Time trial exertion traits of cycling's Grand Tours." *Int J Sports Med*, 30(4): 240-244.
- Edwards, A. M. et Polman, R. C.** (2013). "Pacing and awareness: brain regulation of physical activity." *Sports Med*, 43(11): 1057-1064.
- Edwards, R. H.** (1983). "Biochemical bases of fatigue in exercise performance: catastrophe theory of muscular fatigue." *Biochem Exerc*, 13: 3-28.
- Efklides, A.** (2006). "Metacognition and affect: What can metacognitive experiences tell us about the learning process?" *Educ Res Review*, 1(1): 3-14.

- Enders, H., Cortese, F., Maurer, C., Baltich, J., Protzner, A. B. et Nigg, B. M.** (2016). "Changes in cortical activity measured with EEG during a high-intensity cycling exercise." *J Neurophysiol*, 115(1): 379-388.
- Enoka, R. M., Baudry, S., Rudroff, T., Farina, D., Klass, M. et Duchateau, J.** (2011). "Unraveling the neurophysiology of muscle fatigue." *J Electromyogr Kinesiol*, 21(2): 208-219.
- Faria, E. W., Parker, D. L. et Faria, I. E.** (2005). "The science of cycling." *Sports Med*, 35(4): 285-312.
- Faude, O., Kindermann, W. et Meyer, T.** (2009). "Lactate threshold concepts: how valid are they?" *Sports Med*, 39(6): 469-490.
- Fernandes, A., Galbo, H., Kjaer, M., Mitchell, J. H., Secher, N. H. et Thomas, S. N.** (1990). "Cardiovascular and ventilatory responses to dynamic exercise during epidural anaesthesia in man." *J Physiol*, 420(1): 281-293.
- Fitts, R. H.** (1992). Substrate supply and energy metabolism during brief high intensity exercise: importance of limiting performance. Energy metabolism in exercise and sports. **Lamb, D. R. et V., G. C.** Carmel, Brown & Benchmark. 5: 53-105.
- Fitts, R. H.** (1994). "Cellular mechanisms of muscle fatigue." *Physiol Rev*, 74(1): 49-94.
- Flavell, J. H.** (1979). "Metacognition and cognitive monitoring: A new area of cognitive–developmental inquiry." *American psychol*, 34(10): 906.
- Forys, K. L. et Dahlquist, L. M.** (2007). "The influence of preferred coping style and cognitive strategy on laboratory-induced pain." *Health Psychol*, 26(1): 22-29.
- Foster, C., de Koning, J. J., Bischel, S., Casolino, E., Malterer, K., O'Brien, K., Rodriguez-Marroyo, J., Splinter, A., Thiel, C. et Van Tunen, J.** (2012). Pacing strategies for endurance performance. Endurance training, science and practice. **Mujika, I.** Vitoria-Gasteiz, Inigo Mujika SLU: 85-97.
- Foster, C., deKoning, J. J., Hettinga, F., Lampen, J., Dodge, C., Bobbert, M. et Porcari, J. P.** (2004). "Effect of competitive distance on energy expenditure during simulated competition." *Int J Sports Med*, 25(3): 198-204.

Foster, C., Hendrickson, K. J., Peyer, K., Reiner, B., deKoning, J. J., Lucia, A., Battista, R. A., Hettinga, F. J., Porcari, J. P. et Wright, G. (2009). "Pattern of developing the performance template." *Br J Sports Med*, 43(10): 765-769.

Foster, C., Schrager, M., Snyder, A. C. et Thompson, N. N. (1994). "Pacing strategy and athletic performance." *Sports Med*, 17(2): 77-85.

Foster, C., Snyder, A. C., Thompson, N. N., Green, M. A., Foley, M. et Schrager, M. (1993). "Effect of pacing strategy on cycle time trial performance." *Med Sci Sports Exerc*, 25(3): 383-388.

Froyd, C., Beltrami, F. G., Millet, G. Y. et Noakes, T. D. (2016a). "Central Regulation and Neuromuscular Fatigue during Exercise of Different Durations." *Med Sci Sports Exerc*, 48(6): 1024-1032.

Froyd, C., Beltrami, F. G., Millet, G. Y. et Noakes, T. D. (2016b). "No Critical Peripheral Fatigue Threshold during Intermittent Isometric Time to Task Failure Test with the Knee Extensors." *Front Physiol*, 7(627): 627.

Froyd, C., Millet, G. Y. et Noakes, T. D. (2013). "The development of peripheral fatigue and short-term recovery during self-paced high-intensity exercise." *J Physiol*, 591(5): 1339-1346.

Gagnon, P., Bussieres, J. S., Ribeiro, F., Gagnon, S. L., Saey, D., Gagne, N., Provencher, S. et Maltais, F. (2012). "Influences of spinal anesthesia on exercise tolerance in patients with chronic obstructive pulmonary disease." *Am J Respir Crit Care Med*, 186(7): 606-615.

Gagnon, P., Saey, D., Vivodtzev, I., Laviolette, L., Mainguy, V., Milot, J., Provencher, S. et Maltais, F. (2009). "Impact of preinduced quadriceps fatigue on exercise response in chronic obstructive pulmonary disease and healthy subjects." *J Appl Physiol (1985)*, 107(3): 832-840.

Galloway, S. D. et Maughan, R. J. (1997). "Effects of ambient temperature on the capacity to perform prolonged cycle exercise in man." *Med Sci Sports Exerc*, 29(9): 1240-1249.

Gandevia, S. (1998). "Neural control in human muscle fatigue: changes in muscle afferents, moto neurones and moto cortical drive." *Acta Physiologica*, 162(3): 275-283.

Gandevia, S. C. (1999). "Mind, muscles and motoneurones." *J Sci Med Sport*, 2(3): 167-180.

- Gandevia, S. C.** (2001). "Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue." *Physiol Rev*, 81(4): 1725-1789.
- Gandevia, S. C., Allen, G. M., Butler, J. E. et Taylor, J. L.** (1996). "Supraspinal factors in human muscle fatigue: evidence for suboptimal output from the motor cortex." *J Physiol*, 490 (Pt 2)(2): 529-536.
- Garland, S. J. et Kaufman, M. P.** (1995). "Role of muscle afferents in the inhibition of motoneurons during fatigue." *Adv Exp Med Biol*, 384: 271-278.
- Gayeski, T. E., Connett, R. J. et Honig, C. R.** (1987). "Minimum intracellular PO₂ for maximum cytochrome turnover in red muscle in situ." *Am J Physiol*, 252(5 Pt 2): H906-915.
- Gibala, M. J., González-Alonso, J. et Saltin, B.** (2002). "Dissociation between muscle tricarboxylic acid cycle pool size and aerobic energy provision during prolonged exercise in humans." *J Physiol*, 545(2): 705-713.
- Goldstein, E. B.** (2010). Encyclopedia of perception. Thousand Oaks, California, Sage.
- Gollnick, P., Piehl, K. et Saltin, B.** (1974). "Selective glycogen depletion pattern in human muscle fibres after exercise of varying intensity and at varying pedalling rates." *J Physiol*, 241(1): 45-57.
- Goode, K. T. et Roth, D. L.** (1993). "Factor analysis of cognitions during running: Association with mood change." *J Sport Exerc Psychol*, 15(4): 375-389.
- Gordon, S.** (2005). "Optimising distribution of power during a cycling time trial." *Sports Eng*, 8(2): 81-90.
- Graham, T. E. et Saltin, B.** (1989). "Estimation of the mitochondrial redox state in human skeletal muscle during exercise." *J Appl Physiol (1985)*, 66(2): 561-566.
- Gray, M. A., Harrison, N. A., Wiens, S. et Critchley, H. D.** (2007). "Modulation of emotional appraisal by false physiological feedback during fMRI." *PLoS One*, 2(6): e546.
- Green, H.** (1991). "How important is endogenous muscle glycogen to fatigue in prolonged exercise?" *Can J Physiol Pharmacol*, 69(2): 290-297.

Green, H. J., Sutton, J., Young, P., Cymerman, A. et Houston, C. S. (1989). "Operation Everest II: muscle energetics during maximal exhaustive exercise." *J Appl Physiol* (1985), 66(1): 142-150.

Gros Lambert, A., Grange, C. C., Perrey, S., Maire, J., Tordi, N. et Rouillon, J. D. (2006). "Effects of Aging on Perceived Exertion and Pain During Arm Cranking in Women 70 to 80 years old." *J Sports Sci Med*, 5(2): 208-214.

Grubbström, J., Berglund, B. et Kaijser, L. (1991). "Myocardial blood flow and lactate metabolism at rest and during exercise with reduced arterial oxygen content." *Acta Physiologica*, 142(4): 467-474.

Hakkinen, K. (1993). "Neuromuscular fatigue and recovery in male and female athletes during heavy resistance exercise." *Int J Sports Med*, 14(2): 53-59.

Harms, C. A., Babcock, M. A., McClaran, S. R., Pegelow, D. F., Nickele, G. A., Nelson, W. B. et Dempsey, J. A. (1997). "Respiratory muscle work compromises leg blood flow during maximal exercise." *J Appl Physiol* (1985), 82(5): 1573-1583.

Harte, J. L. et Eifert, G. H. (1995). "The effects of running, environment, and attentional focus on athletes' catecholamine and cortisol levels and mood." *Psychophysiology*, 32(1): 49-54.

Hawley, J. A. et 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.

Hawley, J. A., Palmer, G. S. et Noakes, T. D. (1997). "Effects of 3 days of carbohydrate supplementation on muscle glycogen content and utilisation during a 1-h cycling performance." *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 75(5): 407-412.

Hayward, L., Breitbart, D. et Rymer, W. Z. (1988). "Increased inhibitory effects on close synergists during muscle fatigue in the decerebrate cat." *Brain Res*, 440(1): 199-203.

Heckman, C. J. et Enoka, R. M. (2012). "Motor unit." *Compr Physiol*, 2(4): 2629-2682.

Heil, D. P. (2002). "Body mass scaling of frontal area in competitive cyclists not using aero-handlebars." *Eur J Appl Physiol*, 87(6): 520-528.

Hermansen, L., Hultman, E. et Saltin, B. (1967). "Muscle glycogen during prolonged severe exercise." *Acta Physiol Scand*, 71(2): 129-139.

Hickey, M. S., Costill, D. L., McConell, G. K., Widrick, J. J. et Tanaka, H. (1992). "Day to day variation in time trial cycling performance." *Int J Sports Med*, 13(6): 467-470.

Hill, A. V., Long, C. et Lupton, H. (1924). "Muscular exercise, lactic acid, and the supply and utilisation of oxygen." *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Containing Papers of a Biological Character*, 97(681): 84-138.

Hill, A. V. et Lupton, H. (1923). "Muscular exercise, lactic acid, and the supply and utilization of oxygen." *QJM: Quarterly Journal of Medicine*, (62): 135-171.

Hilty, L., Lutz, K., Maurer, K., Rodenkirch, T., Spengler, C. M., Boutellier, U., Jancke, L. et Amann, M. (2011). "Spinal opioid receptor-sensitive muscle afferents contribute to the fatigue-induced increase in intracortical inhibition in healthy humans." *Exp Physiol*, 96(5): 505-517.

Hochachka, P. W. (1999). "The metabolic implications of intracellular circulation." *Proc Natl Acad Sci USA*, 96(22): 12233-12239.

Hochachka, P. W. et McClelland, G. B. (1997). "Cellular metabolic homeostasis during large-scale change in ATP turnover rates in muscles." *J Exp Biol*, 200(Pt 2): 381-386.

Hogan, M. C., Richardson, R. S. et Haseler, L. J. (1999). "Human muscle performance and PCr hydrolysis with varied inspired oxygen fractions: a³¹P-MRS study." *J Appl Physiol* (1985), 86(4): 1367-1373.

Hoogeveen, A. R. et Hoogsteen, G. S. (1999). "The ventilatory threshold, heart rate, and endurance performance: relationships in elite cyclists." *Int J Sports Med*, 20(2): 114-117.

Hopker, J. G., Caporaso, G., Azzalin, A., Carpenter, R. et Marcora, S. M. (2016). "Locomotor Muscle Fatigue Does Not Alter Oxygen Uptake Kinetics during High-Intensity Exercise." *Front Physiol*, 7: 463.

Hopker, J. G., O'Grady, C. et Pageaux, B. (2017). "Prolonged constant load cycling exercise is associated with reduced gross efficiency and increased muscle oxygen uptake." *Scand J Med Sci Sports*, 27(4): 408-417.

- Hopkins, S. R. et McKenzie, D. C.** (1994). "The laboratory assessment of endurance performance in cyclists." *Can J Appl Physiol*, 19(3): 266-274.
- Housh, D. J., Housh, T. J. et Bauge, S. M.** (1989). "The accuracy of the critical power test for predicting time to exhaustion during cycle ergometry." *Ergonomics*, 32(8): 997-1004.
- Hureau, T. J., Ducrocq, G. P. et Blain, G. M.** (2016). "Peripheral and Central Fatigue Development during All-Out Repeated Cycling Sprints." *Med Sci Sports Exerc*, 48(3): 391-401.
- Hureau, T. J., Olivier, N., Millet, G. Y., Meste, O. et Blain, G. M.** (2014). "Exercise performance is regulated during repeated sprints to limit the development of peripheral fatigue beyond a critical threshold." *Exp Physiol*, 99(7): 951-963.
- Hureau, T. J., Romer, L. M. et Amann, M.** (2018). "The 'sensory tolerance limit': A hypothetical construct determining exercise performance?" *Eur J Sport Sci*, 18(1): 13-24.
- Hurst, H. T., Sinclair, J., Atkins, S., Rylands, L. et Metcalfe, J.** (2017). "Influence of wheel size on muscle activity and tri-axial accelerations during cross-country mountain biking." *J Sports Sci*, 35(14): 1342-1348.
- Hutchinson, J. C. et Tenenbaum, G.** (2007). "Attention focus during physical effort: The mediating role of task intensity." *Psychol Sport Exerc*, 8(2): 233-245.
- Impellizzeri, F., Marcora, S., Rampinini, E., Mognoni, P. et Sassi, A.** (2005). "Correlations between physiological variables and performance in high level cross country off road cyclists." *Br J Sports Med*, 39(10): 747-751.
- Inzlicht, M. et Marcora, S. M.** (2016). "The central governor model of exercise regulation teaches us precious little about the nature of mental fatigue and self-control failure." *Front Psychol*, 7: 656.
- Ivy, J. L., Res, P. T., Sprague, R. C. et Widzer, M. O.** (2003). "Effect of a carbohydrate-protein supplement on endurance performance during exercise of varying intensity." *Int J Sport Nutr Exerc Metab*, 13(3): 382-395.
- Jeukendrup, A. E., Craig, N. P. et Hawley, J. A.** (2000). "The bioenergetics of World Class Cycling." *J Sci Med Sport*, 3(4): 414-433.

Johnson, J. H. et Siegel, D. S. (1992). "Effects of association and dissociation on effort perception." *J Sport Behav*, 15(2): 119.

Johnson, M. A., Sharpe, G. R., Williams, N. C. et Hannah, R. (2015). "Locomotor muscle fatigue is not critically regulated after prior upper body exercise." *J Appl Physiol* (1985) 119(7): 840-850.

Johnson, M. D. et Heckman, C. J. (2014). "Gain control mechanisms in spinal motoneurons." *Front Neural Circuits*, 8: 81.

Johnston, J., Rearick, M. et Slobounov, S. (2001). "Movement-related cortical potentials associated with progressive muscle fatigue in a grasping task." *Clin Neurophysiol*, 112(1): 68-77.

Jones, A. M. et Carter, H. (2000). "The effect of endurance training on parameters of aerobic fitness." *Sports Med*, 29(6): 373-386.

Jones, A. M., Vanhatalo, A., Burnley, M., Morton, R. H. et Poole, D. C. (2010). "Critical power: implications for determination of VO₂max and exercise tolerance." *Med Sci Sports Exerc*, 42(10): 1876-1890.

Jubeau, M., Rupp, T., Temesi, J., Perrey, S., Wuyam, B., Millet, G. Y. et Verges, S. (2017). "Neuromuscular Fatigue during Prolonged Exercise in Hypoxia." *Med Sci Sports Exerc*, 49(3): 430-439.

Kaijser, L., Grubbstrom, J. et Berglund, B. (1993). "Myocardial lactate release during prolonged exercise under hypoxaemia." *Acta Physiol Scand*, 149(4): 427-433.

Katayama, K., Amann, M., Pegelow, D. F., Jacques, A. J. et Dempsey, J. A. (2007). "Effect of arterial oxygenation on quadriceps fatigability during isolated muscle exercise." *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*, 292(3): R1279-1286.

Kaufman, M. P., Hayes, S. G., Adreani, C. M. et Pickar, J. G. (2002). Discharge properties of group III and IV muscle afferents. Sensorimotor control of movement and posture. Boston, Massachusetts, Springer: 25-32.

- Kay, D., Marino, F. E., Cannon, J., St Clair Gibson, A., Lambert, M. I. et Noakes, T. D.** (2001). "Evidence for neuromuscular fatigue during high-intensity cycling in warm, humid conditions." *Eur J Appl Physiol*, 84(1-2): 115-121.
- Kayser, B.** (1996). "Lactate during exercise at high altitude." *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 74(3): 195-205.
- Kayser, B., Narici, M., Binzoni, T., Grassi, B. et Cerretelli, P.** (1994). "Fatigue and exhaustion in chronic hypobaric hypoxia: influence of exercising muscle mass." *J Appl Physiol* (1985), 76(2): 634-640.
- Kjaer, M., Hanel, B., Worm, L., Perko, G., Lewis, S. F., Sahlin, K., Galbo, H. et Secher, N. H.** (1999). "Cardiovascular and neuroendocrine responses to exercise in hypoxia during impaired neural feedback from muscle." *Am J Physiol*, 277(1 Pt 2): R76-85.
- Klass, M., Roelands, B., Levenez, M., Fontenelle, V., Pattyn, N., Meeusen, R. et Duchateau, J.** (2012). "Effects of noradrenaline and dopamine on supraspinal fatigue in well-trained men." *Med Sci Sports Exerc*, 44(12): 2299-2308.
- Konings, M. J., Parkinson, J., Zijdewind, I. et Hettinga, F. J.** (2017). "Racing an Opponent Alters Pacing, Performance and Muscle Force Decline, But Not RPE." *Int J Sports Physiol Perform*: 1-24.
- Korotkov, A., Radovanovic, S., Ljubisavljevic, M., Lyskov, E., Kataeva, G., Roudas, M., Pakhomov, S., Thunberg, J., Medvedev, S. et Johansson, H.** (2005). "Comparison of brain activation after sustained non-fatiguing and fatiguing muscle contraction: a positron emission tomography study." *Exp Brain Res*, 163(1): 65-74.
- Kyle, C. R.** (1979). "Reduction of wind resistance and power output of racing cyclists and runners travelling in groups." *Ergonomics*, 22(4): 387-397.
- Lagrange, F.** (1889). Physiologie des exercices du corps. Paris, Alcan.
- Lambert, E. V., Speechly, D. P., Dennis, S. C. et Noakes, T. D.** (1994). "Enhanced endurance in trained cyclists during moderate intensity exercise following 2 weeks adaptation to a high fat diet." *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 69(4): 287-293.

- Lambert, E. V., St Clair Gibson, A. et Noakes, T. D.** (2005). "Complex systems model of fatigue: integrative homeostatic control of peripheral physiological systems during exercise in humans." *Br J Sports Med*, 39(1): 52-62.
- Laporte, A. M., Doyen, C., Nevo, I. T., Chauveau, J., Hauw, J. J. et Hamon, M.** (1996). "Autoradiographic mapping of serotonin 5-HT1A, 5-HT1D, 5-HT2A and 5-HT3 receptors in the aged human spinal cord." *J Chem Neuroanat*, 11(1): 67-75.
- Light, A. R., Huguen, R. W., Zhang, J., Rainier, J., Liu, Z. et Lee, J.** (2008). "Dorsal root ganglion neurons innervating skeletal muscle respond to physiological combinations of protons, ATP, and lactate mediated by ASIC, P2X, and TRPV1." *J Neurophysiol*, 100(3): 1184-1201.
- Lindsay, F. H., Hawley, J. A., Myburgh, K. H., Schomer, H. H., Noakes, T. D. et Dennis, S. C.** (1996). "Improved athletic performance in highly trained cyclists after interval training." *Med Sci Sports Exerc*, 28(11): 1427-1434.
- Liu, J. Z., Lewandowski, B., Karakasis, C., Yao, B., Siemionow, V., Sahgal, V. et Yue, G. H.** (2007). "Shifting of activation center in the brain during muscle fatigue: an explanation of minimal central fatigue?" *Neuroimage*, 35(1): 299-307.
- Liu, J. Z., Shan, Z. Y., Zhang, L. D., Sahgal, V., Brown, R. W. et Yue, G. H.** (2003). "Human brain activation during sustained and intermittent submaximal fatigue muscle contractions: an FMRI study." *J Neurophysiol*, 90(1): 300-312.
- Lucía, A., Hoyos, J., Pérez, M., Santalla, A. et Chicharro, J.** (2002). "Inverse relationship between VO2max and economy/efficiency in world-class cyclists." *Med Sci Sports Exerc*, 34(12): 2079.
- Lucia, A., Hoyos, J., Perez, M., Santalla, A., Earnest, C. P. et Chicharro, J. L.** (2004). "Which laboratory variable is related with time trial performance time in the Tour de France?" *Br J Sports Med*, 38(5): 636-640.
- Lucia, A., Pardo, J., Duran, A., Hoyos, J. et Chicharro, J.** (1998). "Physiological differences between professional and elite road cyclists." *Int J Sports Med*, 19(05): 342-348.

Lucia, A., Rivero, J., Pérez, M., Serrano, A. L., Calbet, J., Santalla, A. et Chicharro, J. L. (2002). "Determinants of VO (2) kinetics at high power outputs during a ramp exercise protocol." *Med Sci Sports Exerc*, 34(2): 326-331.

Marcora, S. (2010a). "Last word on point: counterpoint: afferent feedback from fatigued locomotor muscles is not an important determinant of endurance exercise performance." *J Appl Physiol* (1985), 108(2): 470-470.

Marcora, S. M. (2008a). "Do we really need a central governor to explain brain regulation of exercise performance?" *Eur J Appl Physiol*, 104(5): 929.

Marcora, S. M. (2008b). "Is peripheral locomotor muscle fatigue during endurance exercise a variable carefully regulated by a negative feedback system?" *J Physiol*, 586(7): 2027-2028.

Marcora, S. M. (2009). "Perception of effort during exercise is independent of afferent feedback from skeletal muscles, heart, and lungs." *J Appl Physiol* (1985), 106(6): 2060-2062.

Marcora, S. M. (2010b). "Counterpoint: afferent feedback from fatigued locomotor muscles is not an important determinant of endurance exercise performance." *J Appl Physiol* (1985), 108(2): 454-456.

Marcora, S. M. (2011). "Role of feedback from Group III and IV muscle afferents in perception of effort, muscle pain, and discomfort." *J Appl Physiol* (1985), 110(5): 1499; author reply 1500.

Marcora, S. M., Bosio, A. et de Morree, H. M. (2008). "Locomotor muscle fatigue increases cardiorespiratory responses and reduces performance during intense cycling exercise independently from metabolic stress." *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*, 294(3): R874-883.

Marcora, S. M. et Staiano, W. (2010a). "The limit to exercise tolerance in humans: mind over muscle?" *Eur J Appl Physiol*, 109(4): 763-770.

Marcora, S. M. et Staiano, W. (2010b). "Reply to: What limits exercise during high-intensity aerobic exercise?" *Eur J Appl Physiol*, 110(3): 663-664.

Marcora, S. M., Staiano, W. et Manning, V. (2009). "Mental fatigue impairs physical performance in humans." *J Appl Physiol* (1985), 106(3): 857-864.

- Marcora, S. M., Staiano, W. et Merlini, M.** (2015). "A randomized controlled trial of brain endurance training (bet) to reduce fatigue during endurance exercise." *Med Sci Sports Exerc*, 47(5S): 198.
- Martin, J. C., Milliken, D. L., Cobb, J. E., McFadden, K. L. et Coggan, A. R.** (1998). "Validation of a Mathematical Model for Road Cycling Power." *J Appl Biomech*, 14(3): 276-291.
- Martin, K., Staiano, W., Menaspa, P., Hennessey, T., Marcora, S., Keegan, R., Thompson, K. G., Martin, D., Halson, S. et Rattray, B.** (2016). "Superior Inhibitory Control and Resistance to Mental Fatigue in Professional Road Cyclists." *PLoS One*, 11(7): e0159907.
- Martin, K., Staiano, W., Menaspa, P., Keegan, R., Hennessey, T., Marcora, S., Halson, S., Martin, D., Thompson, K. et Rattray, B.** (2015a). "The brain of an elite athlete: Do physical training adaptations extend to the brain?" *J Sci Med Sport*, 19: e102.
- Martin, K., Thompson, K. G., Keegan, R., Ball, N. et Rattray, B.** (2015b). "Mental fatigue does not affect maximal anaerobic exercise performance." *Eur J Appl Physiol*, 115(4): 715-725.
- Martin, P. G., Smith, J. L., Butler, J. E., Gandevia, S. C. et Taylor, J. L.** (2006). "Fatigue-sensitive afferents inhibit extensor but not flexor motoneurons in humans." *J Neurosci*, 26(18): 4796-4802.
- Masters, K. S. et Lambert, M. J.** (1989). "The relations between cognitive coping strategies, reasons for running, injury, and performance of marathon runners." *J Sport Exerc Psychol*, 11(2): 161-170.
- Masters, K. S. et Ogles, B. M.** (1998). "Associative and dissociative cognitive strategies in exercise and running: 20 years later, what do we know?" *Sport Psychol*, 12(3): 253-270.
- Mathiassen, S. E. et Winkel, J.** (1991). "Quantifying variation in physical load using exposure-vs-time data." *Ergonomics*, 34(12): 1455-1468.
- Mauger, A. R., Jones, A. M. et Williams, C. A.** (2009). "Influence of feedback and prior experience on pacing during a 4-km cycle time trial." *Med Sci Sports Exerc*, 41(2): 451-458.

- McCann, S. C., Murphy, S. M. et Raedeke, T. D.** (1992). "The effect of performance setting and individual differences on the anxiety-performance relationship for elite cyclists." *Anx Stress Coping*, 5(2): 177-187.
- McCormick, A., Meijen, C. et Marcora, S.** (2015). "Psychological Determinants of Whole-Body Endurance Performance." *Sports Med*, 45(7): 997-1015.
- McCormick, A., Meijen, C. et Marcora, S.** (2017). "Effects of a Motivational Self-Talk Intervention for Endurance Athletes Completing an Ultramarathon." *Sport Psychol*: 1-32.
- McDonald, D. et Kirkby, R. J.** (1995). "Use of dissociation strategies when running becomes difficult: levels of ability and gender differences." *Eur J High Ab*, 6(1): 73-81.
- McMahon, M. E., Boutellier, U., Smith, R. M. et Spengler, C. M.** (2002). "Hyperpnea training attenuates peripheral chemosensitivity and improves cycling endurance." *J Exp Biol*, 205(Pt 24): 3937-3943.
- McNaughton, L. R., Lovell, R. J., Siegler, J., Midgley, A. W., Moore, L. et Bentley, D. J.** (2008). "The effects of caffeine ingestion on time trial cycling performance." *Int J Sports Physiol Perform*, 3(2): 157-163.
- McNeil, C. J., Giesebrecht, S., Gandevia, S. C. et Taylor, J. L.** (2011). "Behaviour of the motoneurone pool in a fatiguing submaximal contraction." *J Physiol*, 589(Pt 14): 3533-3544.
- McNeil, C. J., Martin, P. G., Gandevia, S. C. et Taylor, J. L.** (2009). "The response to paired motor cortical stimuli is abolished at a spinal level during human muscle fatigue." *J Physiol*, 587(23): 5601-5612.
- Micklewright, D., Papadopoulou, E., Swart, J. et Noakes, T.** (2010). "Previous experience influences pacing during 20 km time trial cycling." *Br J Sports Med*, 44(13): 952-960.
- Millet, G. P., Tronche, C. et Grappe, F.** (2014). "Accuracy of indirect estimation of power output from uphill performance in cycling." *Int J Sports Physiol Perform*, 9(5): 777-782.
- Millet, G. Y.** (2011). "Can neuromuscular fatigue explain running strategies and performance in ultra-marathons?" *Sports Med*, 41(6): 489-506.

- Millet, G. Y., Martin, V. et Temesi, J.** (2018). "The Role of the Nervous System in Neuromuscular Fatigue Induced by Ultra-Endurance Exercise." *Appl Physiol Nutr Metab*,(ja).
- Millet, G. Y., Muthalib, M., Jubeau, M., Laursen, P. B. et Nosaka, K.** (2012). "Severe hypoxia affects exercise performance independently of afferent feedback and peripheral fatigue." *J Appl Physiol* (1985), 112(8): 1335-1344.
- Mira, J., Aboodarda, S. J., Floreani, M., Jaswal, R., Moon, S. J., Amery, K., Rupp, T. et Millet, G. Y.** (2018). "Effects of endurance training on neuromuscular fatigue in healthy active men. Part I: Strength loss and muscle fatigue." *Eur J Appl Physiol*: 1-13.
- Mitchell, J. H. et Blomqvist, G.** (1971). "Maximal oxygen uptake." *N Engl J Med*, 284(18): 1018-1022.
- Mitchell, J. H., Sproule, B. J. et Chapman, C. B.** (1958). "The physiological meaning of the maximal oxygen intake test." *J Clin Invest*, 37(4): 538-547.
- Mognoni, P. et Di Prampero, P. E.** (2003). "Gear, inertial work and road slopes as determinants of biomechanics in cycling." *Eur J Appl Physiol*, 90(3-4): 372-376.
- Mole, P. A., Chung, Y., Tran, T. K., Sailasuta, N., Hurd, R. et Jue, T.** (1999). "Myoglobin desaturation with exercise intensity in human gastrocnemius muscle." *Am J Physiol*, 277(1 Pt 2): R173-180.
- Monod, H. et Scherrer, J.** (1965). "The work capacity of a synergic muscular group." *Ergonomics*, 8(3): 329-338.
- Morgan, W. P.** (1978). "The mind of the marathoner." *Psychology Today*, 11: 38-49.
- Morgan, W. P. et Pollock, M. L.** (1977). "Psychologic characterization of the elite distance runner." *Ann N Y Acad Sci*, 301(1): 382-403.
- Morton, R. H. et Billat, L. V.** (2004). "The critical power model for intermittent exercise." *Eur J Appl Physiol*, 91(2-3): 303-307.
- Mosso, A.** (1890). "Les lois de la fatigue étudiées dans les muscles de l'homme." *Archives italiennes de biologie*, 13: 123-186.
- Mosso, A.** (1896). La fatigue intellectuelle et physique. Paris, Alcan.

- Mujika, I. et Padilla, S.** (2001). "Physiological and performance characteristics of male professional road cyclists." *Sports Med*, 31(7): 479-487.
- Myers, J., Walsh, D., Buchanan, N. et Froelicher, V. F.** (1989). "Can maximal cardiopulmonary capacity be recognized by a plateau in oxygen uptake?" *Chest*, 96(6): 1312-1316.
- Nachev, P., Kennard, C. et Husain, M.** (2008). "Functional role of the supplementary and pre-supplementary motor areas." *Nat Rev Neurosci*, 9(11): 856-869.
- Nelson, T. O.** (1996). "Consciousness and metacognition." *Am Psychol*, 51(2): 102.
- Newsholme, E.** (1987). Amino acids, brain neurotransmitters and a functional link between muscle and brain that is important in sustained exercise. *Advances in Myochemistry*. **Benzi, G.** Londres, John Libbey Eurotext: 127-133.
- Nielsen, B., Hales, J. R., Strange, S., Christensen, N. J., Warberg, J. et Saltin, B.** (1993). "Human circulatory and thermoregulatory adaptations with heat acclimation and exercise in a hot, dry environment." *J Physiol*, 460(1): 467-485.
- Nielsen, B., Savard, G., Richter, E. A., Hargreaves, M. et Saltin, B.** (1990). "Muscle blood flow and muscle metabolism during exercise and heat stress." *J Appl Physiol* (1985), 69(3): 1040-1046.
- Nielsen, B., Strange, S., Christensen, N. J., Warberg, J. et Saltin, B.** (1997). "Acute and adaptive responses in humans to exercise in a warm, humid environment." *Pflugers Arch*, 434(1): 49-56.
- Noakes, T. D.** (1997). "1996 JB Wolffe Memorial Lecture. Challenging beliefs: ex Africa semper aliquid novi." *Med Sci Sports Exerc*, 29(5): 571-590.
- Noakes, T. D.** (1998). "Maximal oxygen uptake:" classical" versus" contemporary" viewpoints: a rebuttal." *Med Sci Sports Exerc*, 30(9): 1381-1398.
- Noakes, T. D.** (2000). "Physiological models to understand exercise fatigue and the adaptations that predict or enhance athletic performance." *Scand J Med Sci Sports*, 10(3): 123-145.

- Noakes, T. D.** (2011). "Time to move beyond a brainless exercise physiology: the evidence for complex regulation of human exercise performance." *Appl Physiol Nutr Metab*, 36(1): 23-35.
- Noakes, T. D.** (2012). "Fatigue is a brain-derived emotion that regulates the exercise behavior to ensure the protection of whole body homeostasis." *Front Physiol*, 3: 82.
- Noakes, T. D., Calbet, J. A., Boushel, R., Sondergaard, H., Radegran, G., Wagner, P. D. et Saltin, B.** (2004). "Central regulation of skeletal muscle recruitment explains the reduced maximal cardiac output during exercise in hypoxia." *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*, 287(4): R996-999; author reply R999-1002.
- Noakes, T. D., Peltonen, J. E. et Rusko, H. K.** (2001). "Evidence that a central governor regulates exercise performance during acute hypoxia and hyperoxia." *J Exp Biol*, 204(18): 3225-3234.
- Noakes, T. D. et St Clair Gibson, A.** (2004). "Logical limitations to the "catastrophe" models of fatigue during exercise in humans." *Br J Sports Med*, 38(5): 648-649.
- Noakes, T. D., St Clair Gibson, A. et Lambert, E. V.** (2005). "From catastrophe to complexity: a novel model of integrative central neural regulation of effort and fatigue during exercise in humans: summary and conclusions." *Br J Sports Med*, 39(2): 120-124.
- Noble, B., Kraemer, W., Allen, J., Plank, J. et Woodard, L.** (1986). The integration of physiological cues in effort perception: stimulus strength vs. relative contribution. The perception of exertion in physical work, Springer: 83-96.
- Noble, B. et Robertson, R.** (1996). Perceived Exertion. Champaign, Illinois, Human Kinetics.
- Nonweiler, T.** (1956). The air resistance of racing cyclists, College of Aeronautics Cranfield.
- Nordsborg, N., Mohr, M., Pedersen, L. D., Nielsen, J. J., Langberg, H. et Bangsbo, J.** (2003). "Muscle interstitial potassium kinetics during intense exhaustive exercise: effect of previous arm exercise." *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*, 285(1): R143-148.
- Nybo, L. et Nielsen, B.** (2001). "Hyperthermia and central fatigue during prolonged exercise in humans." *J Appl Physiol* (1985), 91(3): 1055-1060.

O'Leary, T. J., Collett, J., Howells, K. et Morris, M. G. (2017). "Endurance capacity and neuromuscular fatigue following high- vs moderate-intensity endurance training: A randomized trial." *Scand J Med Sci Sports*, 27(12): 1648-1661.

Okano, A. H., Fontes, E. B., Montenegro, R. A., Farinatti Pde, T., Cyrino, E. S., Li, L. M., Bikson, M. et Noakes, T. D. (2015). "Brain stimulation modulates the autonomic nervous system, rating of perceived exertion and performance during maximal exercise." *Br J Sports Med*, 49(18): 1213-1218.

Okwumabua, T. M. (1985). "Psychological and physical contributions to marathon performance: An exploratory investigation." *J Sport Behav*, 8(3): 163.

Padgett, V. R. et Hill, A. K. (1989). "Maximizing athletic performance in endurance events: A comparison of cognitive strategies." *J Appl Soc Psychol*, 19(4): 331-340.

Padilla, S., Mujika, I., Orbananos, J. et Angulo, F. (2000). "Exercise intensity during competition time trials in professional road cycling." *Med Sci Sports Exerc*, 32(4): 850-856.

Pageaux, B. (2014). "The psychobiological model of endurance performance: an effort-based decision-making theory to explain self-paced endurance performance." *Sports Med*, 44(9): 1319-1320.

Pageaux, B. (2016). "Perception of effort in Exercise Science: Definition, measurement and perspectives." *Eur J Sport Sci*, 16(8): 885-894.

Pageaux, B., Angius, L., Hopker, J. G., Lepers, R. et Marcora, S. M. (2015a). "Central alterations of neuromuscular function and feedback from group III-IV muscle afferents following exhaustive high-intensity one-leg dynamic exercise." *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*, 308(12): R1008-1020.

Pageaux, B. et Gaveau, J. (2016). "Studies using pharmacological blockade of muscle afferents provide new insights into the neurophysiology of perceived exertion." *J Physiol*, 594(18): 5049.

Pageaux, B. et Lepers, R. (2016). "Fatigue Induced by Physical and Mental Exertion Increases Perception of Effort and Impairs Subsequent Endurance Performance." *Front Physiol*, 7: 587.

- Pageaux, B., Lepers, R., Dietz, K. C. et Marcora, S. M.** (2014). "Response inhibition impairs subsequent self-paced endurance performance." *Eur J Appl Physiol*, 114(5): 1095-1105.
- Pageaux, B., Lepers, R. et Marcora, S. M.** (2015b). "Stimulation of Muscle Afferents During Muscle Contraction Does Not Impact Perception of Effort." *Med Sci Sports Exerc*, 47(5S): 584.
- Pageaux, B., Marcora, S. et Lepers, R.** (2013). "Prolonged mental exertion does not alter neuromuscular function of the knee extensors." *Med Sci Sports Exerc*.
- Pageaux, B., Marcora, S. M., Rozand, V. et Lepers, R.** (2015c). "Mental fatigue induced by prolonged self-regulation does not exacerbate central fatigue during subsequent whole-body endurance exercise." *Front Hum Neurosci*, 9: 67.
- Paquet, Y., Gros Lambert, A. et Tougne, J.** (2008). "Caractéristiques psychologiques des coureurs qui négocient avec succès le passage des catégories Junior-Espoirs Homme en cyclisme sur route." *communication orale présentée au 3e Séminaire des entraîneurs et cadres techniques de la Fédération française de Cyclisme, Bourges*.
- Parkin, J. M., Carey, M. F., Zhao, S. et Febbraio, M. A.** (1999). "Effect of ambient temperature on human skeletal muscle metabolism during fatiguing submaximal exercise." *J Appl Physiol* (1985), 86(3): 902-908.
- Paton, C. D. et Hopkins, W. G.** (2006). "Variation in performance of elite cyclists from race to race." *Eur J Sport Sci*, 6(01): 25-31.
- Peiffer, J. J. et Abbiss, C. R.** (2011). "Influence of environmental temperature on 40 km cycling time-trial performance." *Int J Sports Physiol Perform*, 6: 208-220.
- Peltonen, J. E., Rusko, H. K., Rantamäki, J., Sweins, K., Niittymäki, S. et Viitasalo, J. T.** (1997). "Effects of oxygen fraction in inspired air on force production and electromyogram activity during ergometer rowing." *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 76(6): 495-503.
- Pennebaker, J. W. et Lightner, J. M.** (1980). "Competition of internal and external information in an exercise setting." *J Pers Soc Psychol*, 39(1): 165-174.
- Peronnet, F. et Thibault, G.** (1989). "Mathematical analysis of running performance and world running records." *J Appl Physiol* (1985), 67(1): 453-465.

Péronnet, F., Thibault, G., Rhodes, E. C. et McKenzie, D. C. (1987). "Correlation between ventilatory threshold and endurance capability in marathon runners." *Med Sci Sports Exerc*, 19(6): 610-615.

Perrey, S., Smirmaul, B. D. P., Fontes, E. B., Noakes, T. D., Bosio, A., Impellizzeri, F. M., Meeusen, R., Nakamura, F. Y., Abbiss, C. R. et Peiffer, J. J. (2010). "Comments on Point: Counterpoint: Afferent feedback from fatigued locomotor muscles is/is not an important determinant of endurance exercise performance." *J Appl Physiol* (1985), 108(2): 458--468.

Perrier, J. F., Rasmussen, H. B., Christensen, R. K. et Petersen, A. V. (2013). "Modulation of the intrinsic properties of motoneurons by serotonin." *Curr Pharm Des*, 19(24): 4371-4384.

Peterman, J. E., Lim, A. C., Ignatz, R. I., Edwards, A. G. et Byrnes, W. C. (2015). "Field-measured drag area is a key correlate of level cycling time trial performance." *PeerJ*, 3: e1144.

Peters, E. J. et Fuglevand, A. J. (1999). "Cessation of human motor unit discharge during sustained maximal voluntary contraction." *Neurosci Lett*, 274(1): 66-70.

Pettorossi, V. E., Della Torre, G., Bortolami, R. et Brunetti, O. (1999). "The role of capsaicin-sensitive muscle afferents in fatigue-induced modulation of the monosynaptic reflex in the rat." *J Physiol*, 515 (Pt 2)(2): 599-607.

Pfeiffer, R. P., Harder, B. P., Landis, D., Barber, D. et Harper, K. (1993). "Correlating Indices of Aerobic Capacity With Performance in Elite Women Road Cyclists." *Journal Stren Cond Res*, 7(4): 201-205.

Pinot, J. (2014). Etude de la puissance mécanique comme variable d'amélioration de la performance en cyclisme à travers l'interface homme-machine, Thèse soutenue publiquement à l'Université de Franche-Comté.

Pinot, J. et Grappe, F. (2011). "The record power profile to assess performance in elite cyclists." *Int J Sports Med*, 32(11): 839-844.

Pinot, J. et Grappe, F. (2014). "Determination of Maximal Aerobic Power from the Record Power Profile to improve cycling training." *J Sci Cycl*, 3(1): 26-32.

Pollatos, O., Kirsch, W. et Schandry, R. (2005). "On the relationship between interoceptive awareness, emotional experience, and brain processes." *Cogn Brain Res*, 25(3): 948-962.

Post, M., Steens, A., Renken, R., Maurits, N. M. et Zijdwind, I. (2009). "Voluntary activation and cortical activity during a sustained maximal contraction: an fMRI study." *Hum Brain Mapp*, 30(3): 1014-1027.

Pritchett, K., Bishop, P., Pritchett, R., Green, M. et Katica, C. (2009). "Acute effects of chocolate milk and a commercial recovery beverage on postexercise recovery indices and endurance cycling performance." *Appl Physiol Nutr Metab*, 34(6): 1017-1022.

Proske, U. (2005). "What is the role of muscle receptors in proprioception?" *Muscle Nerve*, 31(6): 780-787.

Puel, F., Duc, S., Jarlot, B., Grappe, F. et Bertucci, W. (2016). Measurement of mechanical vibrations and muscular activity in cycling on cobblestones at race pace—a single case study. ISBS-Conference Proceedings Archive.

Quinlivan, A., Irwin, C., Grant, G. D., Anoopkumar-Dukie, S., Skinner, T., Leveritt, M. et Desbrow, B. (2015). "The effects of Red Bull energy drink compared with caffeine on cycling time-trial performance." *Int J Sports Physiol Perform*, 10(7): 897-901.

Raskoff, W. J., Goldman, S. et Cohn, K. (1976). "The "athletic heart". Prevalence and physiological significance of left ventricular enlargement in distance runners." *JAMA*, 236(2): 158-162.

Rauch, H. G., St Clair Gibson, A., Lambert, E. V. et Noakes, T. D. (2005). "A signalling role for muscle glycogen in the regulation of pace during prolonged exercise." *Br J Sports Med*, 39(1): 34-38.

Reeves, J. T., Groves, B. M., Sutton, J. R., Wagner, P. D., Cymerman, A., Malconian, M. K., Rock, P. B., Young, P. M. et Houston, C. S. (1987). "Operation Everest II: preservation of cardiac function at extreme altitude." *J Appl Physiol* (1985), 63(2): 531-539.

Rejeski, W. J. et Kenney, E. (1987). "Distracting Attentional Focus from Fatigues Does Task Complexity Make a Difference?" *J Sport Psychol*, 9(1): 66-73.

Renfree, A., West, J., Corbett, M., Rhoden, C. et Gibson, A. S. C. (2012). "Complex interplay between determinants of pacing and performance during 20-km cycle time trials." *Int J Sports Physiol Perform*, 7(2): 121-129.

- Richardson, R. S., Leigh, J., Wagner, P. et Noyszewski, E.** (1999a). "Cellular PO₂ as a determinant of maximal mitochondrial O₂ consumption in trained human skeletal muscle." *J Appl Physiol* (1985), 87(1): 325-331.
- Richardson, R. S., Newcomer, S. et Noyszewski, E.** (2001). "Skeletal muscle intracellular Po₂ assessed by myoglobin desaturation: response to graded exercise." *J Appl Physiol* (1985), 91(6): 2679-2685.
- Richardson, R. S., Noyszewski, E. A., Kendrick, K. F., Leigh, J. S. et Wagner, P. D.** (1995). "Myoglobin O₂ desaturation during exercise. Evidence of limited O₂ transport." *J Clin Invest*, 96(4): 1916-1926.
- Richardson, R. S., Noyszewski, E. A., Leigh, J. S. et Wagner, P. D.** (1998). "Lactate efflux from exercising human skeletal muscle: role of intracellular PO₂." *J Appl Physiol* (1985), 85(2): 627-634.
- Richardson, R. S., Sheldon, J., Poole, D. C., Hopkins, S. R., Ries, A. L. et Wagner, P. D.** (1999b). "Evidence of skeletal muscle metabolic reserve during whole body exercise in patients with chronic obstructive pulmonary disease." *Am J Respir Crit Care Med*, 159(3): 881-885.
- Robertson, R. J., Falkel, J. E., Drash, A. L., Swank, A. M., Metz, K. F., Spungen, S. A. et LeBoeuf, J. R.** (1986). "Effect of blood pH on peripheral and central signals of perceived exertion." *Med Sci Sports Exerc*, 18(1): 114-122.
- Roelands, B., Goekint, M., Heyman, E., Piacentini, M. F., Watson, P., Hasegawa, H., Buyse, L., Pauwels, F., De Schutter, G. et Meeusen, R.** (2008). "Acute norepinephrine reuptake inhibition decreases performance in normal and high ambient temperature." *J Appl Physiol* (1985), 105(1): 206-212.
- Roelands, B. et Meeusen, R.** (2010). "Alterations in central fatigue by pharmacological manipulations of neurotransmitters in normal and high ambient temperature." *Sports Med*, 40(3): 229-246.
- Romer, L. M., Haverkamp, H. C., Amann, M., Lovering, A. T., Pegelow, D. F. et Dempsey, J. A.** (2007). "Effect of acute severe hypoxia on peripheral fatigue and endurance capacity in healthy humans." *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*, 292(1): R598-606.

- Romer, L. M., Lovering, A. T., Haverkamp, H. C., Pegelow, D. F. et Dempsey, J. A.** (2006). "Effect of inspiratory muscle work on peripheral fatigue of locomotor muscles in healthy humans." *J Physiol*, 571(Pt 2): 425-439.
- Rossman, M. J., Garten, R. S., Venturelli, M., Amann, M. et Richardson, R. S.** (2014). "The role of active muscle mass in determining the magnitude of peripheral fatigue during dynamic exercise." *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*, 306(12): R934-940.
- Rossman, M. J., Venturelli, M., McDaniel, J., Amann, M. et Richardson, R. S.** (2012). "Muscle mass and peripheral fatigue: a potential role for afferent feedback?" *Acta Physiol (Oxf)*, 206(4): 242-250.
- Rozand, V., Pageaux, B., Marcora, S. M., Papaxanthis, C. et Lepers, R.** (2014). "Does mental exertion alter maximal muscle activation?" *Front Hum Neurosci*, 8: 755.
- Rushall, B. S. et Shewchuk, M. L.** (1989). "Effects of thought content instructions on swimming performance." *J Sports Med Phys Fitness*, 29(4): 326-334.
- Sacks, M., Milvy, P., Perry, S. et Sherman, L.** (1981). Mental status and psychological coping during a 100-mile race. Psychology of running. **Sacks, M. H. et Sachs, M. L.** Champaign, Illinois, Human Kinetics: 166-175.
- Salam, H., Marcora, S. M. et Hopker, J. G.** (2018). "The effect of mental fatigue on critical power during cycling exercise." *Eur J Appl Physiol*, 118(1): 85-92.
- Saltin, B. et Astrand, P. O.** (1967). "Maximal oxygen uptake in athletes." *J Appl Physiol*, 23(3): 353-358.
- Sandiford, S. D., Green, H. J., Duhamel, T. A., Schertzer, J. D., Perco, J. D. et Ouyang, J.** (2005). "Muscle Na-K-pump and fatigue responses to progressive exercise in normoxia and hypoxia." *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*, 289(2): R441-R449.
- Savard, G., Nielsen, B., Laszczynska, J., Larsen, B. et Saltin, B.** (1988). "Muscle blood flow is not reduced in humans during moderate exercise and heat stress." *J Appl Physiol (1985)*, 64(2): 649-657.

Schallig, W., Veneman, T., Noordhof, D. A., Rodríguez-Marroyo, J. A., Porcari, J. P., de Koning, J. J. et Foster, C. (2017). "The Role of the Rating of Perceived Exertion Template in Pacing." *Int J Sports Physiol Perform*: 1-22.

Sharples, S. A., Koblinger, K., Humphreys, J. M. et Whelan, P. J. (2014). "Dopamine: a parallel pathway for the modulation of spinal locomotor networks." *Front Neural Circuits*, 8: 55.

Shephard, R. J., Foster, C., Lucia, A., Bassett, D. R., Marcora, S. M., González-Alonso, J., Mortensen, S. P., Cheung, S. S., Flouris, A. D. et Kemi, O. J. (2009). "Comments on Point: Counterpoint: maximal oxygen uptake is/is not limited by a central nervous system governor." *J Appl Physiol* (1985), 106(1): 343-346.

Sidhu, S. K., Bentley, D. J. et Carroll, T. J. (2009). "Locomotor exercise induces long-lasting impairments in the capacity of the human motor cortex to voluntarily activate knee extensor muscles." *J Appl Physiol* (1985), 106(2): 556-565.

Sidhu, S. K., Weavil, J. C., Mangum, T. S., Jessop, J. E., Richardson, R. S., Morgan, D. E. et Amann, M. (2017). "Group III/IV locomotor muscle afferents alter motor cortical and corticospinal excitability and promote central fatigue during cycling exercise." *Clin Neurophysiol*, 128(1): 44-55.

Sidhu, S. K., Weavil, J. C., Venturelli, M., Garten, R. S., Rossman, M. J., Richardson, R. S., Gmelch, B. S., Morgan, D. E. et Amann, M. (2014). "Spinal mu-opioid receptor-sensitive lower limb muscle afferents determine corticospinal responsiveness and promote central fatigue in upper limb muscle." *J Physiol*, 592(22): 5011-5024.

Skiba, P. F., Chidnok, W., Vanhatalo, A. et Jones, A. M. (2012). "Modeling the expenditure and reconstitution of work capacity above critical power." *Med Sci Sports Exerc*, 44(8): 1526-1532.

Sloniger, M. A., Cureton, K. J., Prior, B. M. et Evans, E. M. (1997a). "Anaerobic capacity and muscle activation during horizontal and uphill running." *J Appl Physiol* (1985), 83(1): 262-269.

Sloniger, M. A., Cureton, K. J., Prior, B. M. et Evans, E. M. (1997b). "Lower extremity muscle activation during horizontal and uphill running." *J Appl Physiol* (1985), 83(6): 2073-2079.

Smirmaul, B. d. P. C. (2012). "Sense of effort and other unpleasant sensations during exercise: clarifying concepts and mechanisms." *Br J Sports Med*, 46(5): 308-311.

Smith, M., Davison, R., Balmer, J. et Bird, S. (2001). "Reliability of mean power recorded during indoor and outdoor self-paced 40 km cycling time-trials." *Int J Sports Med*, 22(4): 270-274.

Smith, M. R., Marcora, S. M. et Coutts, A. J. (2015). "Mental Fatigue Impairs Intermittent Running Performance." *Med Sci Sports Exerc*, 47(8): 1682-1690.

Smith, S. A., Querry, R. G., Fadel, P. J., Gallagher, K. M., Stromstad, M., Ide, K., Raven, P. B. et Secher, N. H. (2003). "Partial blockade of skeletal muscle somatosensory afferents attenuates baroreflex resetting during exercise in humans." *J Physiol*, 551(Pt 3): 1013-1021.

Spink, K. et Longhurst, K. (1986). "Cognitive strategies and swimming performances: an exploratory study." *Aus J Sci Med Sport*, 18: 9-13.

St Clair Gibson, A., Lambert, E. V., Rauch, L. H., Tucker, R., Baden, D. A., Foster, C. et Noakes, T. D. (2006). "The role of information processing between the brain and peripheral physiological systems in pacing and perception of effort." *Sports Med*, 36(8): 705-722.

St Clair Gibson, A. et Noakes, T. D. (2004). "Evidence for complex system integration and dynamic neural regulation of skeletal muscle recruitment during exercise in humans." *Br J Sports Med*, 38(6): 797-806.

St Clair Gibson, A., Schabort, E. J. et Noakes, T. D. (2001). "Reduced neuromuscular activity and force generation during prolonged cycling." *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*, 281(1): R187-196.

St Clair Gibson, A., Swart, J. et Tucker, R. (2018). "The interaction of psychological and physiological homeostatic drives and role of general control principles in the regulation of physiological systems, exercise and the fatigue process - The Integrative Governor theory." *Eur J Sport Sci*, 18(1): 25-36.

- Stanley, C. T., Pargman, D. et Tenenbaum, G.** (2007). "The effect of attentional coping strategies on perceived exertion in a cycling task." *J Appl Sport Psychol*, 19(3): 352-363.
- Stepito, N. K., Hawley, J. A., Dennis, S. C. et Hopkins, W. G.** (1999). "Effects of different interval-training programs on cycling time-trial performance." *Med Sci Sports Exerc*, 31(5): 736-741.
- Stevinson, C. D. et Biddle, S. J.** (1998). "Cognitive orientations in marathon running and" hitting the wall"." *Br J Sports Med*, 32(3): 229-234.
- Stone, M. R., Thomas, K., Wilkinson, M., St Clair Gibson, A. et Thompson, K. G.** (2011). "Consistency of perceptual and metabolic responses to a laboratory-based simulated 4,000-m cycling time trial." *Eur J Appl Physiol*, 111(8): 1807-1813.
- Suarez, J., Alexander, J. K. et Houston, C. S.** (1987). "Enhanced left ventricular systolic performance at high altitude during Operation Everest II." *Am J Cardiol*, 60(1): 137-142.
- Summers, J. J., Sargent, G. I., Levey, A. J. et Murray, K. D.** (1982). "Middle-aged, non-elite marathon runners: A profile." *Percep Motor Skills*, 54(3): 963-969.
- Svedahl, K. et MacIntosh, B. R.** (2003). "Anaerobic threshold: the concept and methods of measurement." *Can J Appl Physiol*, 28(2): 299-323.
- Swain, D. P.** (1997). "A model for optimizing cycling performance by varying power on hills and in wind." *Med Sci Sports Exerc*, 29(8): 1104-1108.
- Tan, F. H. et Aziz, A. R.** (2005). "Reproducibility of outdoor flat and uphill cycling time trials and their performance correlates with peak power output in moderately trained cyclists." *J Sports Sci Med*, 4(3): 278.
- Tanaka, M. et Watanabe, Y.** (2012). "Supraspinal regulation of physical fatigue." *Neurosci Biobehav Rev*, 36(1): 727-734.
- Tatterson, A. J., Hahn, A. G., Martin, D. T. et Febbraio, M. A.** (2000). "Effects of heat stress on physiological responses and exercise performance in elite cyclists." *J Sci Med Sport*, 3(2): 186-193.

- Taylor, B. J. et Romer, L. M.** (2008). "Effect of expiratory muscle fatigue on exercise tolerance and locomotor muscle fatigue in healthy humans." *J Appl Physiol* (1985), 104(5): 1442-1451.
- Taylor, H. L., Buskirk, E. et Henschel, A.** (1955). "Maximal oxygen intake as an objective measure of cardio-respiratory performance." *J Appl Physiol*, 8(1): 73-80.
- Taylor, J.** (1995). "A conceptual model for integrating athletes' needs and sport demands in the development of competitive mental preparation strategies." *Sport Psychol*, 9(3): 339-357.
- Taylor, J. L., Allen, G. M., Butler, J. E. et Gandevia, S. C.** (2000a). "Supraspinal fatigue during intermittent maximal voluntary contractions of the human elbow flexors." *J Appl Physiol* (1985), 89(1): 305-313.
- Taylor, J. L., Amann, M., Duchateau, J., Meeusen, R. et Rice, C. L.** (2016). "Neural contributions to muscle fatigue: from the brain to the muscle and back again." *Med Sci Sports Exerc*, 48(11): 2294.
- Taylor, J. L., Butler, J. E. et Gandevia, S. C.** (2000b). "Changes in muscle afferents, motoneurons and motor drive during muscle fatigue." *Eur J Appl Physiol*, 83(2-3): 106-115.
- Taylor, J. L. et Gandevia, S. C.** (2008). "A comparison of central aspects of fatigue in submaximal and maximal voluntary contractions." *J Appl Physiol* (1985), 104(2): 542-550.
- Taylor, J. L., Todd, G. et Gandevia, S. C.** (2006). "Evidence for a supraspinal contribution to human muscle fatigue." *Clin Exp Pharmacol Physiol*, 33(4): 400-405.
- Temesi, J., Arnal, P. J., Davranche, K., Bonnefoy, R., Levy, P., Verges, S. et Millet, G. Y.** (2013). "Does central fatigue explain reduced cycling after complete sleep deprivation?" *Med Sci Sports Exerc*, 45(12): 2243-2253.
- Temesi, J., Maturana, F. M., Peyrard, A., Piucco, T., Murias, J. M. et Millet, G. Y.** (2017). "The relationship between oxygen uptake kinetics and neuromuscular fatigue in high-intensity cycling exercise." *Eur J Appl Physiol*, 117(5): 969-978.
- Tenenbaum, G.** (2001). A social-cognitive perspective of perceived exertion and exertion tolerance. Handbook of Sport Psychology. **Singer, R. N., Hausenblas, H. A. et Janelle, C. M.** Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons. 2: 810-820.

Tenenbaum, G. (2005). The study of perceived and sustained effort: Concepts, research findings, and future directions. *Handbook of research on applied sport psychology*. **Hackfort, D., Duda, J. L. et Lidor, L.** Morgantown, Wisconsin, FiT Publishing: 335-349.

Thomas, K., Elmeua, M., Howatson, G. et Goodall, S. (2016). "Intensity-Dependent Contribution of Neuromuscular Fatigue after Constant-Load Cycling." *Med Sci Sports Exerc*, 48(9): 1751-1760.

Thomas, K., Goodall, S., Stone, M., Howatson, G., St Clair Gibson, A. et Ansley, L. (2015). "Central and peripheral fatigue in male cyclists after 4-, 20-, and 40-km time trials." *Med Sci Sports Exerc*, 47(3): 537-546.

Thomas, K., Stone, M. R., Thompson, K. G., St Clair Gibson, A. et Ansley, L. (2012). "Reproducibility of pacing strategy during simulated 20-km cycling time trials in well-trained cyclists." *Eur J Appl Physiol*, 112(1): 223-229.

Tucker, R. (2009). "The anticipatory regulation of performance: the physiological basis for pacing strategies and the development of a perception-based model for exercise performance." *Br J Sports Med*, 43(6): 392-400.

Tucker, R., Bester, A., Lambert, E. V., Noakes, T. D., Vaughan, C. L. et St Clair Gibson, A. (2006). "Non-random fluctuations in power output during self-paced exercise." *Br J Sports Med*, 40(11): 912-917.

Tucker, R., Rauch, L., Harley, Y. X. et Noakes, T. D. (2004). "Impaired exercise performance in the heat is associated with an anticipatory reduction in skeletal muscle recruitment." *Pflügers Archiv*, 448(4): 422-430.

Ulmer, H. V. (1996). "Concept of an extracellular regulation of muscular metabolic rate during heavy exercise in humans by psychophysiological feedback." *Experientia*, 52(5): 416-420.

Van Cutsem, J., Marcora, S., De Pauw, K., Bailey, S., Meeusen, R. et Roelands, B. (2017). "The Effects of Mental Fatigue on Physical Performance: A Systematic Review." *Sports Med*, 47(8): 1569-1588.

van Ingen Schenau, G. J., de Koning, J. J. et de Groot, G. (1992). "The distribution of anaerobic energy in 1000 and 4000 metre cycling bouts." *Int J Sports Med*, 13(6): 447-451.

- Vanhatalo, A., Fulford, J., DiMenna, F. J. et 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.
- Vissing, J.** (2000). "Muscle reflex and central motor control of neuroendocrine activity, glucose homeostasis and circulation during exercise." *Acta Physiol Scand Suppl*, 647: 1-26.
- Wagner, P. D.** (2000). "Reduced maximal cardiac output at altitude—mechanisms and significance." *Respiration physiology*, 120(1): 1-11.
- Walton, M. E., Kennerley, S. W., Bannerman, D. M., Phillips, P. E. et Rushworth, M. F.** (2006). "Weighing up the benefits of work: behavioral and neural analyses of effort-related decision making." *Neural Netw*, 19(8): 1302-1314.
- Weinberg, R. S., Smith, J., Jackson, A. et Gould, D.** (1984). "Effect of association, dissociation and positive self-talk strategies on endurance performance." *Can J Appl Sport Sci*, 9(1): 25-32.
- Wells, M., Atkinson, G. et Marwood, S.** (2013). "Effects of magnitude and frequency of variations in external power output on simulated cycling time-trial performance." *J Sports Sci*, 31(15): 1639-1646.
- Wells, M. S. et Marwood, S.** (2016). "Effects of power variation on cycle performance during simulated hilly time-trials." *Eur J Sport Sci*, 16(8): 912-918.
- Weltan, S. M., Bosch, A. N., Dennis, S. C. et Noakes, T. D.** (1998). "Influence of muscle glycogen content on metabolic regulation." *Am J Physiol*, 274(1 Pt 1): E72-82.
- West, J. B.** (1986). "Lactate during exercise at extreme altitude." *Fed Proc*, 45(13): 2953-2957.
- Westgarth-Taylor, C., Hawley, J. A., Rickard, S., Myburgh, K. H., Noakes, T. D. et Dennis, S. C.** (1997). "Metabolic and performance adaptations to interval training in endurance-trained cyclists." *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 75(4): 298-304.
- Weyand, P. G., Lee, C. S., Martinez-Ruiz, R., Bundle, M. W., Bellizzi, M. J. et Wright, S.** (1999). "High-speed running performance is largely unaffected by hypoxic reductions in aerobic power." *J Appl Physiol* (1985), 86(6): 2059-2064.

Williams, E. L., Jones, H. S., Sparks, S. A., Marchant, D. C., Midgley, A. W. et Mc Naughton, L. R. (2015). "Competitor presence reduces internal attentional focus and improves 16.1 km cycling time trial performance." *J Sci Med Sport*, 18(4): 486-491.

Withers, R. T., Sherman, W. M., Clark, D. G., Esselbach, P. C., Nolan, S. R., Mackay, M. H. et Brinkman, M. (1991). "Muscle metabolism during 30, 60 and 90 s of maximal cycling on an air-braked ergometer." *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 63(5): 354-362.

Wright, R. A. (1996). Brehm's theory of motivation as a model of effort and cardiovascular response. The psychology of action: Linking cognition and motivation to behavior. **Gollwitzer, P. M. et Bargh, J. A.** New York, New York, Guilford Press: 424-453.

Wright, R. A. (2008). "Refining the prediction of effort: Brehm's distinction between potential motivation and motivation intensity." *Soc Pers Psychol Compass*, 2(2): 682-701.

Wrisberg, C. A. et Pein, R. L. (1990). "Past running experience as a mediator of the attentional focus of male and female recreational runners." *Percep Motor Skills*, 70(2): 427-432.

Wüthrich, T. U., Notter, D. A. et Spengler, C. M. (2013). "Effect of inspiratory muscle fatigue on exercise performance taking into account the fatigue-induced excess respiratory drive." *Exp Physiol*, 98(12): 1705-1717.

Zghal, F., Cottin, F., Kenoun, I., Rebai, H., Moalla, W., Dogui, M., Tabka, Z. et Martin, V. (2015). "Improved tolerance of peripheral fatigue by the central nervous system after endurance training." *Eur J Appl Physiol*, 115(7): 1401-1415.